

INTERROS
des
LYCÉES



Physique Chimie

2^{de}

NOUVEAU
Conforme
aux aménagements
de programme
RENTÉE 2017

✓ **Interros et exos** progressifs et minutés

✓ **QCM** pour **tester** ses connaissances

✓ Tous les **corrigés** détaillés

✓ Résumés de **cours** et conseils de **méthode**

In **mémento**
sur les rabats
de couverture



Nathan

KS-573-481

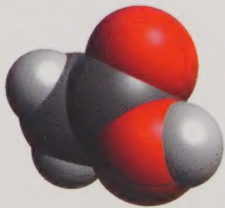
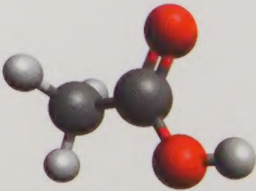


Groupes caractéristiques en chimie organique

Groupe caractéristique	Nom du groupe et/ou famille
—OH	Groupe hydroxyle (alcools)
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—H} \end{array}$	Groupe carboxyle Famille des acides carboxyliques
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—} \end{array}$	Esters
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—} \end{array}$	Cétones
—O—	Éther oxyde
$\begin{array}{c} \diagup \\ \text{—N} \\ \diagdown \end{array}$	Amines
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—N} \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$	Amides

Formules chimiques et modèles moléculaires

Exemple avec l'acide éthanoïque :

$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{H}_3\text{C—C} \\ \text{OH} \end{array}$
Formule brute	Formule semi-développée
CH_3COOH	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H—C—C} \\ \quad \parallel \\ \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \text{O—H} \end{array}$
Formule usuelle	Formule développée
	
Modèle moléculaire compact	Modèle moléculaire éclaté

INTERROS
des
LYCÉES

*Collection dirigée
par Éric Maurette*

Physique Chimie

2^e

Frédéric Masset

Agrégé de physique-chimie

Le papier de cet ouvrage est composé de fibres naturelles, renouvelables et fabriquées à partir de bois provenant de forêts gérées de manière responsable.

 **Nathan**

Remerciements

L'auteur et l'équipe de Prepamath Édition tiennent à remercier Stéphane Bimbot et Stéphane Pasquet pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée à cet ouvrage.

Illustrations : Nicolas Bonté, Florence Hévin

Coordination éditoriale : François Déliac

Conception couverture : Marc & Yvette

Votre avis sur cet ouvrage nous intéresse :
edition.prepamath.com

© Prepamath Édition 2017

© Édition NATHAN 2017 - ISBN 978 209 188725 8

La nouvelle édition de cet ouvrage, complètement revue et corrigée, est conforme au nouveau programme de Physique-Chimie de la classe de Seconde avec les aménagements entrant en vigueur à la rentrée 2017. Son plan respecte le découpage en trois grands thèmes : « La Santé », « La Pratique du Sport » et « L'Univers ». Le ou les thèmes associés à chaque chapitre sont indiqués sous le titre du chapitre. En fin d'ouvrage, un index permet de retrouver rapidement chaque notion importante du programme.

Dans chaque chapitre, on trouvera :

- Un rappel de cours, qui s'appuie sur la résolution pratique d'un exercice type, et qui donne de manière concise tout ce que l'on doit retenir du chapitre étudié.
- Un questionnaire à choix multiples (QCM), qui permet à l'élève de s'assurer qu'il maîtrise bien les concepts fondamentaux du chapitre.
- Des exercices, qui correspondent à tous les types d'exercices que l'on pourra rencontrer en classe de Seconde, et qui ont tous été réellement posés en lycée. Certains sont des applications immédiates du cours, d'autres nécessitent une réflexion plus approfondie et constituent un bon entraînement pour les devoirs en temps limité.
- Enfin, les solutions des énoncés. Certaines sont parfois beaucoup plus détaillées que ce qui est normalement demandé à un élève de Seconde pour un devoir en classe. Ceci est intentionnel, et a pour but d'aider l'élève à garder les idées claires sur les notions fondamentales utilisées.

Je remercie par avance tout lecteur qui me fera part de ses remarques ou suggestions (edition.prepamath.com) et vous souhaite une bonne et profitable lecture.

L'auteur

Table des matières

Chap 1	La vitesse de la lumière et l'année-lumière (l'Univers)	1
	● Cours	1
	● Interros	9
	● Corrigés	18
Chap 2	Ondes et signaux périodiques - Mesures (la santé, l'Univers)	33
	● Cours	33
	● Interros	40
	● Corrigés	47
Chap 3	Réflexion et réfraction de la lumière (la santé, l'Univers)	55
	● Cours	55
	● Interros	60
	● Corrigés	72
Chap 4	Les messages de la lumière (l'Univers)	93
	● Cours	93
	● Interros	99
	● Corrigés	107
Chap 5	Relativité du mouvement (la pratique du sport, l'Univers)	115
	● Cours	115
	● Interros	120
	● Corrigés	129
Chap 6	Le principe d'inertie (la pratique du sport)	141
	● Cours	141
	● Interros	148
	● Corrigés	157

Chap	7	L'interaction gravitationnelle (l'Univers)	171
		● Cours	171
		● Interros	176
		● Corrigés	181
Chap	8	Pression dans les gaz et les liquides (la pratique du sport, l'Univers)	189
		● Cours	189
		● Interros	197
		● Corrigés	209
Chap	9	Extraction, séparation et identification d'espèces chimiques (la santé, la pratique du sport)	229
		● Cours	229
		● Interros	235
		● Corrigés	244
Chap	10	Les éléments chimiques. Structure de l'atome (la santé, l'Univers)	251
		● Cours	251
		● Interros	255
		● Corrigés	258
Chap	11	La classification périodique (la santé, l'Univers)	261
		● Cours	261
		● Interros	265
		● Corrigés	271
Chap	12	Les molécules (la santé, la pratique du sport, l'Univers)	279
		● Cours	279
		● Interros	285
		● Corrigés	290

Chap	13	Groupes caractéristiques (la santé, la pratique du sport)	297
		● Cours	297
		● Interros	303
		● Corrigés	310
Chap	14	La mole. Quantité de matière (la santé, la pratique du sport)	317
		● Cours	317
		● Interros	321
		● Corrigés	328
Chap	15	Concentration d'une espèce en solution (la santé, la pratique du sport)	341
		● Cours	341
		● Interros	345
		● Corrigés	351
Chap	16	Les réactions chimiques (la santé, la pratique du sport)	361
		● Cours	361
		● Interros	366
		● Corrigés	369
Chap	17	Les médicaments (la santé)	377
		● Cours	377
		● Interros	383
		● Corrigés	391
		Annexe A : Classification périodique	399
		Annexe B : Index	401

Tous les conseils qui suivent sont ceux utilisés par un grand nombre de majors (sortis premiers) de Polytechnique ou de l'ENA, par des professionnels de l'organisation et sont également recommandés par de nombreux professeurs. Pour en savoir plus sur le sujet, nous vous conseillons le livre « Comment travailler plus efficacement », par F. Déliac, U. Hadrien, E. Matrullo et E. Maurette, aux Éditions Prepamath.

Faire des « feed-back »

Le « feed-back » est le conseil le plus important et le plus utilisé par ceux qui réussissent brillamment leurs études. Il consiste à contrôler systématiquement, sans s'aider de notes, ce que l'on vient d'apprendre (exercices et cours). Ce contrôle peut se faire mentalement, oralement ou par écrit.

- Dans les transports, essayez de vous rappeler mentalement, et sans vous aider de vos notes, le cours et les exercices vus le matin en classe (feed-back mental).
- Après avoir relu votre cours le soir, essayez de retrouver par écrit les principaux paragraphes et démonstrations sans regarder votre leçon (feed-back écrit).
- Après avoir résolu un problème, prenez 5 minutes pour contrôler par écrit que vous vous rappelez clairement l'énoncé ainsi que la démarche de résolution (feed-back écrit).
- Expliquez à des amis la leçon que vous venez d'apprendre ou l'exercice que vous venez de résoudre : c'est un excellent feed-back oral. Choisissez le type de « feed-back » qui vous convient le mieux et faites-en le plus régulièrement possible (après chaque cours et chaque série d'exercices). Pour être efficace, un « feed-back » doit se faire sans l'aide de vos notes. Ainsi, faire des fiches de résumés de cours à partir de vos cahiers ouverts ne constitue nullement un « feed-back ».

Miser sur la qualité

De nombreux témoignages démontrent que pour obtenir de bons résultats, il est préférable de faire un nombre limité d'exercices, mais plus approfondis, que d'en survoler une grande quantité de piètre qualité. Une tendance très répandue consiste à abattre une grande quantité d'exercices, à la chaîne, mais superficiellement, en espérant que le jour du contrôle, l'on aura déjà vu ce type de problème et que l'on saura s'en souvenir. Cette méthode est absolument inefficace car la seule manière de se souvenir d'un exercice de mathématiques ou de physique, c'est de l'avoir parfaitement compris et assimilé. Ainsi :

- À la fin d'un problème, prenez 5 à 10 minutes pour essayer de trouver un moyen de le généraliser ou de le compliquer (c'est ce que font souvent les professeurs pour concevoir leurs contrôles écrits) ; trouvez ce que cela pourrait changer dans la solution.
- Prenez également l'habitude, après chaque exercice, de faire un « feed-back » en faisant ressortir la démarche générale et en tissant des liens avec le cours. Bref, il ne faut pas vous contenter de résoudre l'exercice, mais il vous faut lui apporter de la valeur ajoutée et vous interroger sur son contenu.
- Idem pour le cours. Ne vous contentez pas de le parcourir de manière passive. Il vous faut avoir la rigueur d'effacer toutes les zones d'ombre. Pour chaque thème, il faut vous demander quels types d'exercices son utilisation permettra de résoudre.

Travailler par « couches successives »

Cette méthode, très utile pour les étudiants préparant des examens ou des révisions, peut également être utilisée dès le lycée.

On observe que pour apprendre un gros volume de cours, rien n'est plus inefficace que de l'attaquer de front, de manière linéaire. La bonne manière consiste à d'abord survoler l'ensemble, en ne retenant que la structure, c'est-à-dire les grands titres, ainsi que les noms des paragraphes (première couche, étape devant durer 5 minutes). Dans l'étape suivante (deuxième couche, d'une durée de 10 minutes), on reprend son cours du début en retenant cette fois également les théorèmes et résultats importants. Après cette deuxième couche, on a déjà une idée claire de la structure de l'ensemble du cours. On peut alors aborder la dernière étape (troisième couche) : on reprend son cours au début pour, cette fois-ci, l'étudier en profondeur en apprenant le détail des démonstrations.

Il est à noter que cette méthode peut être également appliquée avec succès à des matières littéraires, ainsi qu'aux révisions du bac de français. Par exemple :

- Pour la préparation d'un contrôle, on commencera par passer en revue rapidement l'ensemble du cours et des exercices du chapitre précédemment étudiés, avant de les réviser en détail. Ainsi aura-t-on développé une compréhension synthétique et claire.
- De même, avant d'aborder un problème volumineux (tel qu'un contrôle écrit), il est préférable de survoler l'ensemble du problème avant de l'attaquer.

Travailler sa rapidité

Pour acquérir de la rapidité, 3 voies sont possibles :

- Prenez l'habitude, en travaillant chez vous, de vous concentrer sur une seule chose à la fois, c'est-à-dire ne pas attaquer un problème ou une dissertation, en

rêvassant à ce que vous pourriez trouver à manger dans le réfrigérateur ou en écoutant de la musique.

- Prenez l'habitude de travailler chez vous dans les mêmes conditions qu'en devoirs surveillés. Le minutage de chacun des exercices de ce livre est fait en ce sens. Cependant, cela ne devrait pas, une fois la résolution faite, vous empêcher d'y réfléchir plus calmement afin de vérifier la bonne assimilation du problème. Si les seuls moments où vous vous pressez sont les contrôles écrits, vous ne deviendrez jamais rapide.
- Essayez de contenir tout votre travail à la maison dans une plage horaire serrée. Engagez-vous, par exemple, à travailler chez vous tous les jours entre 18 h et 20 h et efforcez-vous de ne jamais déborder (quelle que soit votre charge de travail). En effet, si l'on ne se donne pas de limite de temps pour accomplir un travail, l'on a naturellement tendance à le laisser traîner en longueur et à rêvasser. L'étroitesse de la plage horaire vous obligera à ne pas vous endormir et à devenir efficace.

La vitesse de la lumière et l'année-lumière

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Puissances de dix
3. L'Univers et les étoiles

Thème : l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Jean Moulin, Lyon

La sonde spatiale la plus rapide jamais construite par l'homme est animée d'une vitesse d'environ 100 km.s^{-1} . Combien de temps lui faudrait-il pour :

- 1 arriver à l'étoile la plus proche ?
- 2 traverser notre galaxie selon son diamètre ?

Données :

- Distance de l'étoile la plus proche : 4,2 années-lumière
- Diamètre de la Galaxie : 10^{18} km
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c \approx 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

Voir corrigé page 8

La manipulation des très grands nombres requiert une bonne maîtrise de l'utilisation des puissances de dix et des ordres de grandeur. C'est l'objet de ce chapitre, qui présente également l'année-lumière, unité la mieux adaptée à la mesure des distances entre étoiles.

2 Puissances de dix

2.1 Notation scientifique

Écrire un nombre aussi grand par exemple que six mille milliards (6 000 000 000 000) est particulièrement pénible (et potentiellement source d'erreur) si on ne trouve pas un moyen de condenser la notation. Une façon commode d'exprimer ce nombre consiste à le décomposer de la manière suivante :

$$6\,000\,000\,000\,000 = 6 \times 1\,000\,000\,000\,000 = 6 \times 10^{12}$$

où 10^{12} (lire « dix exposant douze » ou « dix à la puissance douze ») correspond au produit de 10 douze fois par lui-même :

$$10^{12} = \underbrace{10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10}_{12 \text{ facteurs}}$$

À RETENIR

De manière pratique, le nombre 10^n s'écrit comme le chiffre 1 suivi de n zéros, si n est un entier positif.

Notons au passage un cas particulier :

$$10^0 = 1.$$

Les puissances de dix peuvent également permettre de manipuler des très petits nombres.

À RETENIR

De manière pratique, le nombre 10^{-n} s'écrit comme n zéros suivis du chiffre 1 (bien évidemment, le premier zéro est suivi d'une virgule).

Définition 1

On appelle notation scientifique l'écriture d'un nombre sous la forme $\pm a \times 10^n$, où a est un nombre tel que $1 \leq a < 10$ et où n est un entier relatif.

Exemples:

- Écrivons le nombre 0,003 41 en notation scientifique :

$$0,003\,41 = 3,41 \times 0,001 = 3,41 \times 10^{-3}.$$

Nous avons bien $1 \leq 3,41 < 10$.

- Écrivons le nombre $-3\,894\,020\,000$ en notation scientifique.

$$-3\,894\,020\,000 = -3,894\,02 \times 1\,000\,000\,000 = -3,894\,02 \times 10^9.$$

Nous avons bien $1 \leq 3,894\,02 < 10$.

2.2 Manipuler les puissances de dix avec une calculatrice scientifique

Supposons que l'on veuille entrer le nombre $5,6 \times 10^9$ dans la calculatrice. Sur la plupart des modèles, la calculatrice est munie d'une touche **EE** ou **EXP**. Cette touche signifie « ... multiplié par dix à la puissance... ». Ainsi, dans notre exemple, qui se lit « cinq virgule six *multiplié par dix à la puissance neuf* », il faut entrer la séquence :

5 **.** **6** **EXP** **9**

ATTENTION

Pour entrer le nombre 10^{12} , il ne faut pas entrer la séquence :

1 0 EXP 1 2

Entrez cette séquence et enfoncez la touche **=**. La calculatrice « répond » 10^{13} (1E13). Le nombre que vous venez d'entrer est 10^{13} et non 10^{12} ! C'est logique : vous avez donné à la calculatrice :

$$10 \times 10^{12} = 10^1 \times 10^{12} = 10^{13}.$$

Le nombre que vous voulez entrer est simplement 1×10^{12} , donc la séquence correcte est : **1 EXP 1 2**

Vous pouvez vérifier en enfonceant la touche **=** que la calculatrice a bien « compris » 10^{12} .

2.3 Préfixes de puissances de dix et conversions

On résume dans le tableau suivant les préfixes utilisés pour exprimer des puissances de dix, et les symboles correspondants.

Puissance de 10	Préfixe	Symbole	Puissance de 10	Préfixe	Symbole
1	unité				
$10^1 = 10$	déca-	da	$10^{-1} = 0,1$	déci-	d
$10^2 = 100$	hecto-	h	$10^{-2} = 0,01$	centi-	c
$10^3 = 1\,000$	kilo-	k	$10^{-3} = 0,001$	milli-	m
10^6	méga-	M	10^{-6}	micro-	μ
10^9	giga-	G	10^{-9}	nano-	n
10^{12}	téra-	T	10^{-12}	pico-	p
10^{15}	péta-	P	10^{-15}	femto-	f
10^{18}	exa-	E	10^{-18}	atto-	a

Remarque : on utilise des majuscules pour les symboles des préfixes représentant des grands nombres (supérieurs à mille), alors qu'on utilise des minuscules pour les symboles des préfixes représentant des petits nombres. Dans le cas des préfixes déca- et déci- on utilise « da » comme symbole du premier, pour éviter de le confondre avec le symbole du second. De la même manière, on a recours à la lettre grecque μ pour le symbole de micro-, afin de ne pas le confondre avec le symbole de milli-.

Exemple : une masse de mille grammes est également un kilogramme (symbole kg). Une distance d'un milliardième de mètre est également un nanomètre (symbole nm). Une tension d'un million de volts est également un mégavolt (symbole MV). Une force de dix newtons est également un décanewton, de symbole daN (cette force est approximativement le poids d'un objet d'une masse d'un kilogramme).

Exemple : on veut convertir la masse $m = 5,6 \times 10^7 \mu\text{g}$ en kilogrammes (kg).
 Nous avons $1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g} = 10^3 \times 10^6 \mu\text{g}$. Le microgramme représente donc une unité de masse un milliard de fois plus *petite* que le kilogramme. Donc :

$$m = \frac{5,6 \times 10^7}{10^9} = 5,6 \times 10^{-2} \text{ kg}.$$

On remarque que 0,056 kg valent 560 millions de μg .

De la même manière, une distance de 3,4 km est égale à 3 400 m. La règle suivante permet d'éviter les erreurs de conversion.

MÉTHODE

Dans une conversion d'unités, plus une unité est grande, plus la valeur numérique associée est petite.

$$L = \underbrace{3,4}_{\text{petit}} \underbrace{\text{km}}_{\text{grand}} = \underbrace{3\,400}_{\text{grand}} \underbrace{\text{m}}_{\text{petit}}.$$

MÉTHODE

Lorsque l'on convertit des grandeurs où interviennent des unités composées ou des puissances d'unités (par exemple $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ou $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$), il faut procéder par étapes.

Exemple : on veut convertir la masse volumique de l'aluminium $\rho = 2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ en kilogrammes par mètre cube ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$).

$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$. Donc $1 \text{ m}^3 = 100^3 \text{ cm}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$.

1 cm^3 d'aluminium pèse 2,7 g, donc 1 m^3 pèse $2,7 \times 10^6 \text{ g}$.

$1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$, donc $1 \text{ g} = \frac{1}{10^3} \text{ kg}$ et 1 m^3 d'aluminium pèse :

$$\frac{2,7 \times 10^6}{10^3} \text{ kg}.$$

Donc $\rho = 2,7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Règles de calculs sur les puissances de dix

À RETENIR

Le produit de deux puissances de dix est la puissance somme :

$$10^a \times 10^b = 10^{a+b}.$$

Exemple :

$$10^2 \times 10^3 = (10 \times 10) \times (10 \times 10 \times 10) = 10^{2+3} = 10^5.$$

➔ À RETENIR

Le quotient de deux puissances de dix est la puissance différence :

$$\frac{10^a}{10^b} = 10^{a-b}.$$

L'inverse d'une puissance de dix est la puissance opposée :

$$\frac{1}{10^a} = 10^{-a}.$$

Exemples :

- $10^8 \times 10^9 = 10^{8+9} = 10^{17}.$
- $\frac{10^3}{10^8} = 10^{3-8} = 10^{-5}.$
- $10^4 \times 10^{-4} = 10^{4-4} = 10^0 = 1.$
- $\frac{1}{10^{-20}} = 10^{20}.$

⚠ ATTENTION

Une erreur particulièrement désastreuse en devoir consiste à oublier la partie $\times 10^{\dots}$, et à vouloir condenser l'écriture de la manière suivante : $5 \times 10^6 = 5^6$. Cela est bien évidemment *faux*. Le premier nombre vaut :

$$5 \times \underbrace{10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10}_{6 \text{ facteurs}} (= 5\,000\,000)$$

alors que le deuxième vaut :

$$\underbrace{5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5 \times 5}_{6 \text{ facteurs}} (= 15\,625).$$

2.1 Chiffres significatifs et ordres de grandeur

En Physique, on se contente la plupart du temps d'une valeur approchée.

Lorsque l'on donne une valeur approchée, le nombre des chiffres indiqués apporte une information sur la précision de la valeur donnée.

Par exemple, dire que la masse d'un objet vaut 3,5 g signifie que sa masse est comprise à coup sûr entre 3,45 g et 3,55 g, tandis que dire que sa masse vaut 3,50 g implique que sa masse est comprise entre 3,495 g et 3,505 g.

Une grandeur est donc toujours donnée avec un certain nombre de chiffres significatifs.

Exemple : si l'on dispose d'une méthode pour mesurer des distances au millimètre près, alors, lorsque l'on exprime la distance mesurée en mètres, on doit garder trois chiffres après la virgule : le troisième et dernier chiffre correspond aux millimètres, et est significatif. Garder un chiffre supplémentaire donnerait l'impression fallacieuse que ce chiffre est significatif, et donc que l'on peut mesurer la distance au dixième de millimètre près, ce qui est impossible.

À RETENIR

L'ordre de grandeur d'une quantité correspond à sa valeur exprimée avec au maximum un chiffre significatif.

Exemple : la distance à vol d'oiseau entre Paris et Marseille est de 660 km. Un ordre de grandeur de cette distance est 700 km. Cet ordre de grandeur comporte un chiffre significatif.

3 L'Univers et les étoiles

L'essentiel des informations qui nous parviennent de l'Univers est véhiculé par la lumière. Nous allons nous intéresser en premier à la vitesse de celle-ci, puis nous en déduirons une unité commode pour exprimer des distances astronomiques.

3.1 Vitesse de la lumière

À RETENIR

La vitesse de la lumière dans le vide vaut environ $300\,000\text{ km.s}^{-1}$, c'est-à-dire $3,0 \times 10^8\text{ m.s}^{-1}$.

Sa valeur précise est $299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$. Notons qu'il s'agit d'une valeur exacte (par définition). En effet, depuis 1983, le Bureau International des Poids et Mesures *définit* le mètre comme la distance parcourue par la lumière dans le vide pendant $1/299\,792\,458^{\circ}$ de seconde.

Remarques

- On note généralement c la vitesse de la lumière dans le vide (qui provient de l'initiale du mot *célérité*, parfois utilisé à la place du mot « vitesse »).
- La vitesse de la lumière dans l'air est pratiquement égale à sa vitesse dans le vide : elle est environ 0,03 % plus petite que cette dernière. Il est donc légitime d'utiliser la valeur $3,0 \times 10^8\text{ m.s}^{-1}$ pour la vitesse de la lumière dans l'air. Notons toutefois que la lettre c désigne exclusivement la vitesse de la lumière dans le vide.

3.2 L'année-lumière

Le Soleil, accompagné de son cortège de planètes, est une des cent milliards d'étoiles (10^{11}) de notre galaxie, la Voie Lactée. Sa forme est celle d'un disque aplati en rotation d'un diamètre d'environ 10^{18} km .

Lorsqu'on travaille sur des distances dont les valeurs sont aussi importantes, il est commode d'utiliser une unité appelée *année-lumière*.

Définition 2

L'année-lumière (de symbole « al » ou « a.l. ») est la distance parcourue en une année par la lumière dans le vide.

Nous avons :

$$1 \text{ al} = 3,0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \approx 9,5 \times 10^{15} \text{ m},$$

car il y a 60 secondes par minute, 60 minutes par heure, 24 heures par jour et 365 jours par an.

Il s'agit d'une unité de distance extrêmement grande. Ainsi, l'étoile la plus proche du Soleil (*Proxima* du Centaure) est à une distance d'environ 4,2 années-lumière (voir l'exercice-type de ce chapitre). Le diamètre de notre galaxie est d'environ cent mille années-lumière (la lumière met cent mille ans à la traverser). Notre galaxie n'est pas le plus grand objet astronomique que l'on peut envisager. L'Univers contient plus de 10^{12} (mille milliards de) galaxies analogues à la nôtre en taille et en nombre d'étoiles.

La galaxie la plus proche de la nôtre est la galaxie d'Andromède (appelée aussi M31), qui se trouve à un peu plus de deux millions d'années-lumière (soit environ 2×10^{19} km).

Cela signifie que la lumière qui nous parvient d'Andromède a voyagé dans le vide pendant environ *deux millions d'années*. Nous la voyons telle qu'elle était au moment où l'Homme apparaissait sur Terre !

À RETENIR

Voir loin, c'est voir dans le passé : lorsque nous observons un objet astronomique situé à x années-lumières, nous le voyons tel qu'il était il y a x années.

On observe des galaxies situées à plus de dix milliards d'années-lumière de la nôtre.

On indique quelques distances ou tailles caractéristiques sur l'échelle ci-dessous.

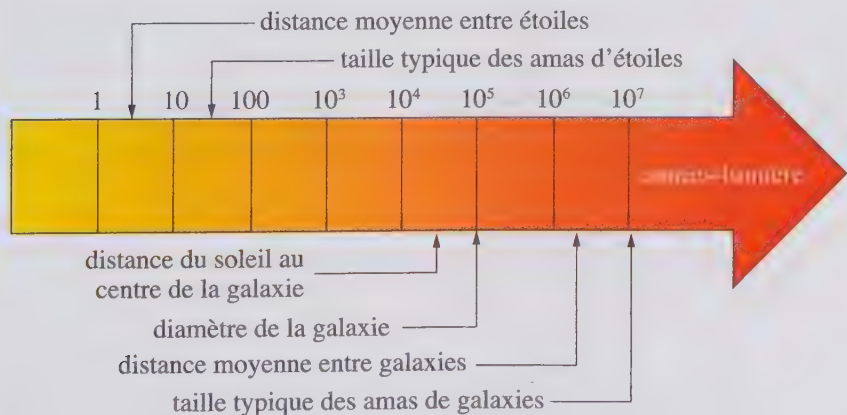


Figure 1.1 – Échelle de tailles ou distances dans l'Univers.

 Solution de l'exercice type

Lycée Jean Moulin, Lyon

Le temps mis par la sonde pour parcourir une distance d est $t = \frac{d}{v}$, où v est la vitesse de la sonde, exprimée en km.h^{-1} .

Pour trouver le temps nécessaire, il nous faut d'abord convertir la distance de la sonde à l'étoile la plus proche en *kilomètres*.

Une année comporte 365 jours de 24 heures, et il y a 60 minutes par heure et 60 secondes par minute. Donc au total, une année fait :

$$T = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \approx 3,15 \times 10^7 \text{ s.}$$

En une année, la lumière parcourt donc une distance

$$D = c \times T = 3,0 \times 10^5 \times 3,15 \times 10^7 = 9,5 \times 10^{12} \text{ km.}$$

La distance de la sonde à l'étoile la plus proche est donc :

$$d = 4,2 \times 9,5 \times 10^{12} = 4,0 \times 10^{13} \text{ km.}$$

À la vitesse $v = 100 \text{ km.s}^{-1}$, la sonde va mettre :

$$t = \frac{4 \times 10^{13}}{100} = 4 \times 10^{11} \text{ s}$$

pour arriver à l'étoile.

Convertissons cette durée en années :

$$t = \frac{4 \times 10^{11}}{N} = \frac{4 \times 10^{11}}{3,16 \times 10^7} \approx 13\,000 \text{ ans.}$$

La sonde la plus rapide jamais construite par l'Homme mettrait treize mille ans pour atteindre l'étoile la plus proche.

Si on répète ce calcul avec le diamètre de la Galaxie, on obtient :

$$t' = 10^{16} \text{ s} \approx 3 \times 10^8 \text{ ans.}$$

Cette même sonde mettrait trois cent millions d'années à traverser la Galaxie, soit cent cinquante fois le temps qui s'est écoulé depuis que l'Homme est apparu sur Terre !

On réalise grâce à cet exercice combien il est difficile pour l'exploration spatiale de s'extraire du Système Solaire. Toutes les sondes envoyées jusqu'à présent ont exploré des planètes ou des lunes de notre système. L'humanité est confinée au Système Solaire pour encore bien longtemps.

Voir énoncé page 1

1 **Testez vos connaissances**

5 min

➔ Corrigé
p. 18

- 1** Sur une calculatrice, on entre un nombre en appuyant successivement sur les touches **1** **0** **EXP** **8**. Le nombre que l'on vient d'entrer est :
 - a** 10^8
 - b** 10^7
 - c** 10^9
- 2** Sans utiliser la calculatrice, combien vaut $10^8 \times \frac{10^9}{10^{15}}$?
 - a** 10^{32}
 - b** 1 000
 - c** 100
- 3** L'année-lumière est une unité : **a** de temps **b** de distance **c** de vitesse
- 4** Si on exprime en année-lumière la distance entre Paris et New York, on va obtenir : **a** un très grand nombre **b** un très petit nombre
- 5** De la même manière que l'on a défini l'année-lumière, on peut définir le jour-lumière. Il représente une distance :
 - a** dix fois plus grande que l'année-lumière.
 - b** 365 fois plus grande que l'année-lumière.
 - c** dix fois plus petite que l'année-lumière.
 - d** 365 fois plus petite que l'année-lumière.

2 **Ordres de grandeur**



10 min

➔ Corrigé
p. 18

Lycée Lakanal, Sceaux

- 1** Donner un ordre de grandeur des longueurs suivantes :
 - (a) Distance Soleil-Sirius : 8,611 al.
 - (b) Distance du quasar 3C273 : 2,44 milliards d'années-lumière.
 - (c) Distance d'Uranus au Soleil : 2 871 millions de kilomètres.
 - (d) Distance entre les étoiles Alpha et Proxima Centauri : 0,237 al.
- 2** Exprimer les distances de la question précédente en centimètres, en utilisant les puissances de dix. Combien de chiffres significatifs doit-on garder dans le résultat ?

3 Parc automobile de la Terre



5 min

Corrigé
p. 19

Lycée Massena, Nice

Il y a environ un milliard et demi de voitures sur Terre. Supposons que chacune parcourt par an, en moyenne, une distance de 8 000 km.

- 1 Quelle est la distance totale parcourue par l'ensemble des voitures sur Terre en un an ?
- 2 Exprimer cette distance en année-lumière.

On prendra comme valeur de la vitesse de la lumière $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

4 Distance de la nébuleuse Messier 42



10 min

Corrigé
p. 19

Lycée Paul Valéry, Montpellier

La nébuleuse Messier 42, dans la constellation d'Orion, est située à une distance $d = 1,4 \times 10^{16} \text{ km}$.

- 1 Exprimer cette distance en années-lumière.
- 2 Vers quelle date a été émise la lumière qui nous parvient aujourd'hui de Messier 42 ?

5 Distances en temps-lumière



5 min

Corrigé
p. 20

Lycée Condorcet, Paris

- 1 Le Soleil est situé à 150 millions de kilomètres de la Terre. Combien de temps sa lumière met-elle à nous parvenir ?
- 2 La Lune est située à 384 000 km en moyenne de la Terre. Combien de temps sa lumière met-elle à nous parvenir ?

6 Parsec



5 min

Corrigé
p. 20

Lycée Ronsard, Vendôme

On appelle parsec (de symbole pc) une unité de distance qui vaut :
 $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ années-lumière}$.

Le super-amas de galaxies local est centré sur la galaxie elliptique géante M87, située à 15 Mpc (mégaparsecs). Combien de temps la lumière issue de M87 met-elle à nous parvenir ? On effectuera le moins de calculs possible.

7 Distance des quasars

10 min

Corrigé
p. 20**Lycée Champollion, Grenoble**

Les quasars sont parmi les astres les plus brillants et les plus lointains de l'Univers observable. Le quasar 3C345 est l'un des mieux connus. Sa lumière met 8,2 milliards d'années pour nous parvenir.

- 1 Quelle est sa distance, en années-lumière ?
- 2 Quelle est sa distance en kilomètres ?
- 3 Si un brusque changement des propriétés observables du quasar se produit, au bout de combien de temps un observateur terrien pourra-t-il s'en rendre compte ?

8 Puissances de dix

15 min

Corrigé
p. 21**Lycée Descartes, Tours**

Exprimer en mètres les longueurs suivantes, en utilisant la notation scientifique, puis les convertir en années-lumière.

- 1 Longueur d'une bactérie : 1,3 μm .
- 2 Distance Cannes-Nice : 25 km.
- 3 Diamètre du système solaire : douze milliards de kilomètres.
- 4 Distance entre notre galaxie et la galaxie d'Andromède : vingt et un milliards de milliards de kilomètres.

Donnée : vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

9 Nanosondes interstellaires

5 min

Corrigé
p. 22**Lycée Lakanal, Sceaux**

Il existe un projet, appelé *Breakthrough Starshot*, dont le but est d'envoyer des nanosondes spatiales vers l'étoile la plus proche, *Proxima Centauri*, située à 4,23 al. Ces nanosondes spatiales seraient accélérées jusqu'à une vitesse d'un cinquième de la vitesse de la lumière par un rayon laser. Nous négligeons ici le temps (relativement bref) nécessaire à l'accélération des nanosondes et supposons qu'elles parcourent l'intégralité du trajet à la vitesse $c/5$, où c est la vitesse de la lumière. Lorsqu'elles arriveront au voisinage de *Proxima Centauri*, ces sondes enverront vers la Terre un signal électromagnétique (qui se propage à la vitesse de la lumière) contenant des informations sur son système planétaire.

Si l'on imagine que les nanosondes sont envoyées au début de l'année 2032, en quelle année recevrons-nous le signal qu'elles nous enverront ? On effectuera le moins de calculs possible.

10 Distance d'étoile**Lycée Montesquieu, Bordeaux**

L'étoile Véga est située six cent vingt million de fois plus loin que la Lune. Lorsque l'on envoie un signal radar de la Terre vers la Lune, on en reçoit l'écho au bout de 2,6 secondes.

- 1** Quelle est la distance entre la Lune et la Terre ?
- 2** À quelle distance, exprimée en années-lumière, se trouve Véga ?

Donnée : vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

11 Univers observable**Lycée Camille Jullian, Bordeaux**

Pour voir une étoile, il faut que la lumière de cette étoile parvienne à notre œil.

Depuis la Terre nous ne pouvons voir qu'une partie de l'Univers : celle dont la lumière a eu le temps, depuis la création de l'Univers, de parvenir jusqu'à nous.

C'est ce qu'on appelle l'Univers observable. Il s'agit donc d'une zone de l'espace, de forme sphérique, centrée sur la Terre, qui contient tous les objets dont la lumière a eu le temps de nous parvenir.

- 1** Sachant que l'Univers a été créé il y a environ quatorze milliards d'années, donner le rayon de l'Univers observable en années-lumière.
- 2** En déduire la valeur de ce rayon en mètre.
- 3** Exprimer, en m^3 , le volume de l'Univers observable, en utilisant la notation scientifique.

Indication :

Le volume V d'une sphère de rayon R est donné par :

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

On prendra comme valeur pour la vitesse de la lumière dans le vide :

$$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

12 Taille de la Galaxie

★★

5 min

Corrigé
p. 23**Lycée Joffre, Montpellier**

Notre galaxie, la Voie Lactée, est une galaxie dite *spirale*. Vue de face, elle a l'aspect représenté sur la figure page ci-dessous.

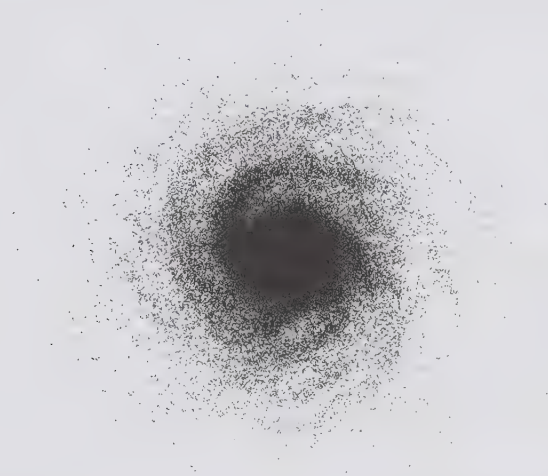


Figure 1.2 – Aspect d'une galaxie spirale analogue à la nôtre, vue de face. Le nombre typique d'étoiles ($\sim 10^{11}$) dans une galaxie réelle est bien supérieur au nombre de points de cette figure ($\sim 10^5$).

Les étoiles y sont réparties dans un disque, où apparaît une structure spirale. Ce disque est relativement mince. Son épaisseur est de l'ordre du dixième de son diamètre.

La lumière met environ 50 000 ans à voyager du centre vers le bord du disque.

- 1** Quel est, en années-lumière, le diamètre de la Galaxie ?
- 2** Quelle est, en années-lumière, l'épaisseur du disque ?

13 Supernova 1987A

★★

5 min

Corrigé
p. 24**Lycée Edgar Quinet, Paris**

Le 24 février 1987 a été découverte une supernova dans la nébuleuse de la Tarentule, dans le Grand Nuage de Magellan (galaxie naine irrégulière satellite de la nôtre). Une supernova correspond à l'explosion d'une étoile de grande masse, lorsqu'elle arrive en fin de vie. Sachant que l'explosion a eu lieu 168 000 ans auparavant, indiquer à quelle distance se trouve cette supernova, en kiloparsec.

Donnée : un parsec, de symbole pc, représente 3,26 années-lumière.

14 Changements d'échelle



25 min

Corrigé
p. 24

Lycée François Mauriac, Bordeaux

La distance Terre-Lune est égale à trente fois le diamètre terrestre. La distance Terre-Soleil est égale à 390 fois la distance Terre-Lune. Le rayon de l'orbite de Neptune, planète la plus externe du Système Solaire, est de 30 unités astronomiques. L'étoile la plus proche de notre Système Solaire est à une distance qui représente 4 500 fois le diamètre de l'orbite de Neptune. Le diamètre de notre galaxie est égal à vingt mille fois la distance qui nous sépare de l'étoile la plus proche. Enfin, la galaxie d'Andromède, notre plus proche voisine, est à une distance égale à 25 fois le diamètre de notre galaxie.

- 1 Exprimer, en mètre et en utilisant la notation scientifique, chacune des distances mentionnées dans cet énoncé.
- 2 Exprimer ensuite chacune de ces distances en utilisant l'unité la plus appropriée parmi les suivantes : kilomètre, unité astronomique (symbole U.A.), année-lumière (symbole a.l.), parsec (symbole pc), mégaparsec.

Données :

- L'unité astronomique est égale à la distance Terre-Soleil.
- Un parsec vaut 3,26 années-lumières.
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
- Diamètre de la Terre : 12 756 km.

15 Voir dans le passé



10 min

Corrigé
p. 26

Lycée Henri IV, Paris

Les explosions de supernovae sont parmi les événements les plus violents de l'Univers. L'étude de leur « courbe de lumière » permet d'inférer leur distance. L'une des supernovae les plus lointaines détectées à ce jour, SN UDS10Wil, se trouve à la distance $d = 3,1 \text{ Gpc}$.

- 1 Quand l'explosion a-t-elle eu lieu ?
- 2 La Terre existait-elle à ce moment là ?

Données :

- Un parsec, de symbole pc, représente 3,26 années-lumière.
- La Terre s'est formée il y a environ $4,5 \times 10^9$ années.

16 Système Solaire et Galaxie



20 min

Corrigé
p. 27

Lycée Claude Nicolas Ledoux, Besançon

On se propose dans cet exercice de donner une modélisation à échelle humaine du Système Solaire, et de l'extrapoler de manière à donner une idée de la taille de la Galaxie.

On suppose que le modèle du Soleil a la taille d'une bille (de diamètre 1,4 cm).

- 1 Quel est le diamètre du modèle de la Terre ? À quelle distance doit-on le placer de la bille « Soleil » ?
- 2 Les régions externes du Système Solaire peuvent être considérées comme situées au niveau de l'orbite de la planète naine Pluton (à 40 unités astronomiques du Soleil). À quelle distance de la bille « Soleil » faut-il placer le modèle de Pluton ?

- 3** La plus proche étoile se trouve à environ quatre années-lumière du Système Solaire. On la modélise par une autre bille identique au modèle du Soleil. À quelle distance faut-il la placer de la bille « Soleil » pour respecter l'échelle ?
- 4** Le diamètre de la Galaxie (notre galaxie) est d'environ 100 000 années-lumière. Quel est le diamètre de son modèle ? Que pensez-vous de cette valeur ?

Données :

- Rayon de la Terre : $R_T = 6\,378\text{ km}$
- Rayon du Soleil : $R_S = 696\,000\text{ km}$
- Distance Terre-Soleil : $D = 149\,597\,870\text{ km}$
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3 \times 10^5\text{ km.s}^{-1}$

17 Nébuleuse planétaire

★★★

25 min

Corrigé
p. 28

Lycée Louis Le Grand, Paris

La plupart des étoiles, lorsqu'elles arrivent en fin de vie, rejettent une partie de leur masse dans l'espace « vide » entre les étoiles, appelé milieu interstellaire. Nous nous intéressons ici à la fin de la vie d'une étoile ayant même masse que le Soleil.

- 1** Pour simplifier, nous supposons que cette étoile est entièrement composée d'atomes d'hydrogène. Combien d'atomes y a-t-il dans l'étoile ?
- 2** L'étoile éjecte 10 % de sa masse en un nuage sphérique homogène ayant un diamètre d'une année de lumière (on appelle ce nuage une nébuleuse planétaire, à cause de la ressemblance fortuite de ce nuage avec une planète, au télescope).
- Rappeler la définition d'une année-lumière et calculer sa valeur dans les unités du Système International.
 - En déduire le volume du nuage, dans les unités du Système International.
 - Combien d'atomes y a-t-il dans ce nuage ?
 - Combien d'atome(s) trouve-t-on, en moyenne, dans un centimètre cube du nuage ?
 - Comparer cette quantité à celui du meilleur vide obtenu sur Terre, où l'on dénombre environ un millier de particules résiduelles par centimètre cube.

Données :

- Masse du Soleil : $M_S = 2,0 \times 10^{30}\text{ kg}$
- Masse d'un atome d'hydrogène : $m = 1,7 \times 10^{-27}\text{ kg}$
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,0 \times 10^8\text{ m.s}^{-1}$
- Volume d'une sphère de rayon R : $V = (4/3)\pi R^3$

18 Les étoiles sont-elles des Soleils ?

★★★

10 min

Corrigé
p. 29**Lycée Thérèse d'Avila, Lille**

L'étoile Véga, dans la constellation de la Lyre, apparaît, pour un observateur terrestre, 63 milliards de fois moins lumineuse que le Soleil. Elle est aussi 1,4 millions de fois plus loin que ce dernier.

Quelle serait la luminosité apparente de l'étoile Véga, comparée à celle du Soleil, si on la plaçait à la même distance de la Terre que celui-ci ?

Indication :

La luminosité apparente d'une étoile décroît comme le carré de sa distance à l'observateur.

19 Supernova de Tycho Brahé

★★★

20 min

Corrigé
p. 29**Lycée Louis le Grand, Paris**

La radiosource 3C10 est le reste de l'explosion d'une supernova observée en 1572 par Tycho Brahé. Elle est située à une distance $d = 8,5 \times 10^{16}$ km.

- 1** Calculer la distance parcourue par la lumière en une journée.
- 2** Calculer la distance parcourue par la lumière en une année. Comment appelle-t-on cette distance ?
- 3** À quelle distance, exprimée en années-lumière, se trouve la radiosource 3C10 ?
- 4** L'explosion a-t-elle eu lieu en 1572 ? Justifier.
- 5** Donner une estimation de la date à laquelle l'explosion a réellement eu lieu. Quelle est l'incertitude sur cette date ?

Donnée : célérité de la lumière : $c = 3,0 \times 10^8$ m.s⁻¹.

20 Manipuler les puissances de dix

★★★

20 min

Corrigé
p. 30**Lycée Ernest Renan, Saint-Brieuc**

Calculer le rapport entre le volume de l'Univers observable (rayon : 15 milliards d'années-lumière) et le volume d'un noyau atomique (rayon : 2×10^{-15} m).

Indication : tous les modèles de calculatrices scientifiques ne permettent pas de manipuler un nombre aussi énorme. Aussi, il est demandé dans cet exercice de poser tous les calculs.

- Données :*
- Vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3 \times 10^8$ m.s⁻¹
 - Volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$

21 Temps lumière

15 min

Corrigé
p. 31

Lycée d'Arsonval, Brive

- 1** Rappeler ce qu'est la définition de l'année-lumière.
- 2** Quelle serait, d'après vous, la définition d'un mois-lumière ? Exprimer cette distance dans l'unité du Système International.
- 3** Exprimer la distance de Jupiter à sa lune Callisto en secondes-lumière.
- 4** La sonde Voyager 1 est l'objet fabriqué par l'homme le plus éloigné de la Terre, à la distance $d = 19,0 \times 10^9$ km. Exprimer sa distance en heures-lumière.
- 5** Lors d'une opposition, la planète Mars passe à la distance $d = 51$ millions de kilomètres de la Terre.
 - (a) Exprimer cette distance en secondes-lumières.
 - (b) Un ingénieur du centre de commandes de la sonde Curiosity, qui explore la planète Mars, envoie l'ordre de faire pivoter l'une des caméras de la sonde. Au bout de combien de temps voit-il l'effet de cet ordre sur l'écran de la caméra ?

Données :

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Distance Jupiter-Callisto : $1,88 \times 10^6$ km

1 QCM Testez vos connaissances

Enoncé
p. 9

- 1 La séquence de touches **EXP** **8** signifie : « ... $\times 10^8$ ». On entre donc le nombre :

$$10 \times 10^8 = 10^9.$$

- 2 Il suffit d'utiliser les règles de calcul sur les exposants. Cela donne :

$$10^{8+9-15} = 10^{17-15} = 10^2 = 100.$$

- 3 C'est une unité de *distance*. L'*année* est une unité de temps.
 4 Un très petit nombre, naturellement. L'année-lumière est de l'ordre de grandeur de la distance qui sépare les étoiles dans la Galaxie.
 5 Un jour représente la $1/365^e$ partie d'une année, donc en une journée la lumière parcourt une distance 365 plus petite qu'en un an. La réponse correcte est donc la réponse *d*.

2 Ordres de grandeur

Enoncé
p. 9

Lycée Lakanal, Sceaux

- 1 Les ordres de grandeurs sont les suivants (on ne garde qu'un seul chiffre significatif) :
- (a) Distance Soleil-Sirius : $d \approx 8$ al.
 - (b) Distance du quasar 3C273 : $d' \approx 2 \times 10^9$ al.
 - (c) Distance d'Uranus au Soleil : $d'' \approx 3 \times 10^3$ millions de kilomètres, soit trois milliards de kilomètres.
 - (d) Distance entre les étoiles Alpha et Proxima Centauri : $d''' \approx 0,2$ al.
- 2 On exprime les distances de l'énoncé en centimètre, en utilisant des puissances de dix. On rappelle au préalable qu'une année-lumière représente une distance de :

$$D = 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 3,00 \times 10^8 = 9,46 \times 10^{15} \text{ m} = 9,46 \times 10^{17} \text{ cm}$$

Nous gardons les trois chiffres significatifs pour ce résultat.

- (a) Distance Soleil-Sirius :

$$d = 8,61 \times 9,46 \times 10^{17} = 8,15 \times 10^{18} \text{ cm.}$$

La valeur de l'énoncé et la valeur d'une année-lumière évaluée plus haut étant données sur trois chiffres significatifs, nous gardons trois chiffres significatifs dans le résultat.

- (b) Distance du quasar 3C273 :

$$d' = 2,44 \times 10^9 \times 9,46 \times 10^{17} = 2,31 \times 10^{27} \text{ cm.}$$

Nous gardons là-encore trois chiffres significatifs.

- (c) Distance d'Uranus au Soleil :

$$d'' = 2\,871 \times 10^6 \text{ km} = 2,871 \times 10^{14} \text{ cm.}$$

Nous gardons ici les quatre chiffres significatifs de l'énoncé.

(d) Distance entre les étoiles Alpha et Proxima Centauri :

$$d''' = 0,237 \times 9,46 \times 10^{17} = 2,24 \times 10^{17} \text{ cm}$$

Compte-tenu de la précision des données de l'énoncé, nous gardons ici trois chiffres significatifs.



Parc automobile de la Terre

➔ **Énoncé**
p. 10

Lycée Massena, Nice

1 La distance parcourue au total est :

$$D = 1,5 \times 10^9 \times 8\,000 = 1,2 \times 10^{13} \text{ km} = 1,2 \times 10^{16} \text{ m}$$

L'ensemble des voitures sur Terre parcourent environ 12 000 milliards de kilomètres par an.

2 Nous avons :

$$1 \text{ al} = 3,0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 9,5 \times 10^{15} \text{ m.}$$

La distance totale parcourue est donc :

$$D = \frac{1,2 \times 10^{16}}{9,5 \times 10^{15}} \approx 1,3 \text{ al.}$$

Cette distance est comparable à une année-lumière.



Distance de la nébuleuse Messier 42

➔ **Énoncé**
p. 10

Lycée Paul Valéry, Montpellier

1 Nous avons vu en cours qu'une année-lumière représente $9,46 \times 10^{12}$ km, donc la distance d de Messier 42 (en abrégé M42) est :

$$d = \frac{1,4 \times 10^{16}}{9,46 \times 10^{12}} = 1,5 \times 10^3 \text{ années-lumière.}$$

Nous ne gardons que deux chiffres significatifs puisque la distance de M42 n'est donnée qu'avec deux chiffres significatifs dans l'énoncé.

2 La lumière met donc environ 1 500 années pour nous parvenir de Messier 42, donc la lumière que l'on en reçoit aujourd'hui a été émise vers l'année :

$$a = 2\,017 - 1\,500 = 517 \approx 500.$$

Compte-tenu du nombre de chiffres significatifs, cette date n'est précise qu'à un siècle près.

5 Distances en temps-lumière

Enoncé
p. 10

Lycée Condorcet, Paris

- 1 Le temps t que met la lumière pour nous parvenir d'une source située dans le vide à la distance d est donné par : $t = \frac{d}{c}$, où c est la célérité de la lumière dans le vide.

En appliquant cette formule au Soleil, on obtient :

$$t = \frac{150 \times 10^6}{3,00 \times 10^5} = 500 \text{ s} = 8 \text{ min } 20 \text{ s.}$$

- 2 En l'appliquant à la Lune, on trouve :

$$t = \frac{384\,000}{3,00 \times 10^5} = 1,28 \text{ s.}$$

6 Parsec

Enoncé
p. 10

Lycée Ronsard, Vendôme

Calculons la distance de M87 en années-lumière. Cette galaxie se trouve à 15 Mpc, soit 15 millions de parsecs, soit encore :

$$d = 3,26 \times 15 \times 10^6 = 4,9 \times 10^7 \text{ années-lumière.}$$

La lumière met donc, par définition de l'année-lumière, $4,9 \times 10^7$ années pour nous parvenir, c'est-à-dire environ 50 millions d'années.

7 Distance des quasars

Enoncé
p. 11

Lycée Champollion, Grenoble

- 1 Par définition, l'année-lumière est la distance parcourue en une année. Donc en 8,2 milliards d'années, la lumière parcourt (dans le vide) une distance de 8,2 milliards d'années-lumière.

3C345 est donc situé à 8,2 milliards d'années-lumière.

- 2 Nous avons vu en cours qu'une année-lumière représente $9,5 \times 10^{12}$ km. La distance de 3C345 en kilomètres est donc :

$$d = 8,2 \times 10^9 \times 9,5 \times 10^{12} = 7,8 \times 10^{22} \text{ km.}$$

Nous gardons deux chiffres significatifs dans ce résultat, en accord avec la précision des données de l'énoncé.

- 3 Si un changement brusque des propriétés observables du quasar se produit, son aspect ou son spectre (une notion que nous retrouverons ultérieurement dans le cours de physique) vont être modifiés, et l'information correspondante, véhiculée par la lumière, va se propager vers l'observateur à la vitesse de la lumière. Un observateur terrestre ne sera donc informé des modifications que 8,2 milliards d'années après ce changement.

8 Puissances de dix

Enoncé
p. 11

Lycée Descartes, Tours

Pour cet exercice, il est utile d'établir au préalable combien de mètres représente une année-lumière. On l'obtient par le calcul (qu'il faut savoir répéter sans erreur) :

$$D = 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 3,0 \times 10^8 = 9,5 \times 10^{15} \text{ m}$$

MÉTHODE

Il est souhaitable de se souvenir de l'ordre de grandeur d'une année-lumière (10^{16} m) pour identifier immédiatement une erreur de calcul.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 1 Longueur d'une bactérie : $1,3 \times 10^{-6}$ m. En années-lumière, cette distance vaut :

$$\frac{1,3 \times 10^{-6}}{9,5 \times 10^{15}} = 1,4 \times 10^{-22} \text{ années-lumière}$$

Sans surprise, il s'agit d'un nombre extrêmement petit.

- 2 Distance Cannes-Nice : $25 \times 10^3 = 2,5 \times 10^4$ m. Après conversion, cette distance vaut :

$$\frac{2,5 \times 10^4}{9,5 \times 10^{15}} = 2,6 \times 10^{-12} \text{ années-lumière}$$

- 3 Diamètre du système solaire : douze milliards de kilomètres, soit $12 \times 10^9 \times 10^3 = 1,2 \times 10^{13}$ m. Après conversion, cette distance vaut :

$$\frac{1,2 \times 10^{13}}{9,5 \times 10^{15}} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ années-lumière}$$

Il s'agit encore d'un petit nombre. Ceci indique que notre Système Solaire est beaucoup plus petit que la distance typique entre étoiles dans la Galaxie.

- 4 Distance entre notre galaxie et la galaxie d'Andromède : vingt et un milliards de milliards de kilomètres, soit :

$21 \times 10^9 \times 10^9 \times 10^3 = 2,1 \times 10^{22}$ m. Après conversion, cette distance vaut :

$$\frac{2,1 \times 10^{22}}{9,5 \times 10^{15}} = 2,2 \times 10^6 \text{ années-lumière}$$

Notons qu'au contraire des unités plus traditionnelles telles que le mètre, on n'a pas coutume d'utiliser des multiples ou sous-multiples de l'année-lumière. Il serait légitime de dire que la distance qui nous sépare de la galaxie d'Andromède est de 2,2 méga-années-lumière, mais dans la pratique on ne rencontrera jamais cette expression.

9 Nanosondes interstellaires

Enoncé
p. 11

Lycée Lakanal, Sceaux

La lumière met 4,23 ans à parcourir la distance qui nous sépare de *Proxima Centauri*. Un objet cinq fois plus « lent » met cinq fois plus de temps, soit une durée $T = 4,23 \times 5 \approx 21,2$ ans pour parcourir la distance séparant le Système Solaire du système de *Proxima Centauri*. C'est la durée du voyage. À celle-ci il faut ajouter le temps que mettra le signal envoyé vers la Terre pour nous parvenir. Puisqu'il voyage à la vitesse de la lumière, il mettra $t = 4,23$ ans. Au total, entre le lancement et la réception du signal, il se sera donc écoulé $T + t \approx 25,4$ ans, soient 25 ans et un peu moins de 5 mois.

Si le lancement a lieu au début de l'année 2032, le signal sera reçu en 2057.

10 Distance d'étoile

Enoncé
p. 12

Lycée Montesquieu, Bordeaux

- 1 Le signal radar envoyé sur la Lune effectue un aller *et un retour*, donc la distance d à la Lune est de 1,3 secondes-lumière. On peut convertir cette distance en multipliant par la vitesse de la lumière. On obtient :

$$d \approx 1,3 \times 3 \times 10^8 \approx 3,9 \times 10^8 \text{ m} \approx 390\,000 \text{ km}$$

- 2 La distance de Véga est :

$$D = d \times 620 \times 10^6 \approx 8,1 \times 10^8 \text{ secondes-lumière}$$

Par divisions successives, nous convertissons cette distance en années-lumière :

$$d = \frac{8,1 \times 10^9}{60} = 1,35 \times 10^7 \text{ minutes-lumières}$$

puis

$$d = \frac{1,35 \times 10^8}{60} = 2,25 \times 10^5 \text{ heures-lumières}$$

puis

$$d = \frac{2,25 \times 10^6}{24} = 9,4 \times 10^3 \text{ jours-lumières}$$

et enfin :

$$d = \frac{9,4 \times 10^3}{365} \approx 26 \text{ années-lumières}$$

Compte tenu de la précision des données de l'énoncé, nous ne conservons que deux chiffres significatifs dans le résultat final.

MÉTHODE

Nous aurions également pu résoudre cet exercice de manière plus conventionnelle en cherchant tout d'abord la distance à Véra en mètres :

$$d_V = 3,9 \times 10^8 \times 6,2 \times 10^8 = 2,4 \times 10^{17} \text{ m},$$

pour ensuite la convertir en années-lumière :

$$d_V = \frac{2,4 \times 10^{17}}{9,46 \times 10^{15}} \approx 26 \text{ al.}$$

Cette méthode requiert toutefois de se souvenir par cœur de la valeur d'une année-lumière en mètres, ou de répéter le calcul permettant de l'obtenir, ce qui est au final équivalent, en quantité de calculs à effectuer, à la méthode proposée.

11 Univers observable

Enoncé
p. 12

Lycée Camille Jullian, Bordeaux

- 1 La lumière qui nous parvient du bord de l'Univers observable a voyagé dans le vide pendant 14 milliards d'années. Elle a donc parcouru une distance $R = 14$ milliards d'années-lumière. C'est le rayon de l'Univers observable.

- 2 La valeur en mètre d'une année-lumière est :

$$1 \text{ al} = 3,0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \approx 9,5 \times 10^{15} \text{ m}$$

donc le rayon de l'Univers observable est :

$$R = 14 \times 10^9 \times 9,5 \times 10^{15} \approx 1,3 \times 10^{26} \text{ m}$$

- 3 Le volume s'en déduit par :

$$V = \frac{4}{3} \pi \times (1,3 \times 10^{26})^3 \approx 9,2 \times 10^{78} \text{ m}^3$$

12 Taille de la Galaxie

Enoncé
p. 13

Lycée Joffre, Montpellier

- 1 L'énoncé indique que le rayon du disque est de 50 000 années-lumière, donc son diamètre vaut 100 000 années-lumière.
- 2 D'après les indications de l'énoncé, l'épaisseur du disque vaut le dixième de cette valeur, soit 10 000 années-lumière.

13 Supernova 1987A

→ Enoncé
p. 13

Lycée Edgar Quinet, Paris

L'explosion a eu lieu il y a 168 000 ans, donc la lumière qui en est issue a voyagé tout ce temps pour nous parvenir « aujourd'hui » (le temps écoulé depuis 1987 est négligeable devant le temps de voyage). La lumière a donc parcouru, par définition, une distance de 168 mille années lumière. Nous pouvons l'exprimer à présent en parsecs :

$$d = \frac{168 \times 10^3}{3,26} = 51,5 \times 10^3 \text{ pc} = 51,5 \text{ kpc}.$$

Nous gardons ici trois chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle sont données toutes les valeurs de l'énoncé.

MÉTHODE

Notons que pour résoudre cet exercice il n'est pas nécessaire d'évaluer la longueur d'une année-lumière en utilisant la vitesse de la lumière dans le vide. Il suffit de connaître la définition de l'année-lumière et d'utiliser la correspondance avec le parsec donnée dans l'énoncé.

14 Changements d'échelle

→ Enoncé
p. 14

Lycée François Mauriac, Bordeaux

- 1 Nous écrivons la suite des distances en commençant par la plus petite, préalablement convertie en mètres (unité de longueur du Système International). Celle-ci, diamètre de la Terre, vaut :

$$d_1 = 12756 \times 10^3 = 1,2756 \times 10^7 \text{ m}.$$

La distance Terre-Lune vaut donc :

$$d_2 = 30 \times d_1 = 3,8 \times 10^8 \text{ m}.$$

Nous gardons ici deux chiffres significatifs, puisque nous ne disposons pas d'une précision supérieure sur le rapport des tailles de l'orbite lunaire et de la Terre. Nous pouvons à présent inférer la distance de la Terre au Soleil :

$$d_3 = d_2 \times 390 = 1,5 \times 10^{11} \text{ m}.$$

qui représente donc, d'après l'énoncé, une unité astronomique. Le rayon d_4 de l'orbite de Neptune vaut 30 unités astronomiques, c.-à-d. 30 fois la distance Terre-Soleil :

$$d_4 = 30 \times d_3 = 4,5 \times 10^{12} \text{ m}.$$

On en déduit la distance de l'étoile la plus proche :

$$d_5 = 2 \times d_4 \times 4500 = 4,1 \times 10^{16} \text{ m}.$$

Le facteur 2 additionnel est dû au fait que l'on doit ici considérer le diamètre de l'orbite de Neptune, et non son rayon. En continuant cette

suite, nous calculons le diamètre d_6 de notre galaxie :

$$d_6 = 2 \times 10^4 \times 4,1 \times 10^{16} = 8,2 \times 10^{20} \text{ m}$$

puis la distance de la galaxie d'Andromède :

$$d_7 = 25 \times d_6 = 2,1 \times 10^{22} \text{ m.}$$



MÉTHODE

Il faut prendre garde au fait que toute erreur sur un résultat intermédiaire se répercute aussi sur les résultats suivants.

2 Nous exprimons à présent chacune de ces grandeurs dans l'unité la plus adaptée. Une unité adaptée sera une unité dans laquelle la valeur numérique de la distance ne sera un nombre ni trop grand, ni trop petit. On voit par exemple qu'il est totalement inadéquat d'exprimer le diamètre de la Terre en années-lumière ou la distance de la galaxie d'Andromède en mètres. Nous commençons donc par écrire ce que valent en mètres les différentes unités de distance proposées dans l'énoncé, puis par comparaison avec les valeurs trouvées précédemment, nous choisissons dans chaque cas une unité adaptée. Les unités proposées sont :

- Le kilomètre : $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$.
- L'unité astronomique : $1 \text{ UA} = 1,5 \times 10^8 \text{ m}$.
- L'année-lumière vaut :

$$1 \text{ a.l.} = 3 \times 10^8 \times 86\,400 \times 365 = 9,5 \times 10^{15} \text{ m.}$$

- Le parsec est donné par :

$$1 \text{ pc} = 3,26 \times 9,5 \times 10^{15} = 3,1 \times 10^{16} \text{ m.}$$

- Finalement un mégaparsec (voir le chapitre sur les puissances de dix) 10^6 parsecs, c.-à-d. :

$$1 \text{ Mpc} = 3,1 \times 10^{22} \text{ m.}$$

Par comparaison avec les valeurs trouvées précédemment, nous pouvons suggérer les égalités suivantes :

$$d_1 = 12\,756 \text{ km},$$

(il s'agit ici précisément de l'unité de l'énoncé), puis :

$$d_2 = 3,8 \times 10^5 \text{ km},$$

puis :

$$d_3 = 1 \text{ UA (par définition)},$$

puis :

$$d_4 = 30 \text{ UA (valeur donnée dans l'énoncé)},$$

puis

$$d_5 = \frac{4,1 \times 10^{16}}{9,5 \times 10^{15}} = 4,3 \text{ a.l.} = \frac{4,1 \times 10^{16}}{3,1 \times 10^{16}} = 1,3 \text{ pc.}$$

De la même manière, le diamètre de la Galaxie est :

$$d_6 = \frac{8,2 \times 10^{20}}{9,5 \times 10^{15}} = 86 \times 10^3 \text{ a.l.} = \frac{8,2 \times 10^{20}}{3,1 \times 10^{16}} = 26 \times 10^3 \text{ pc.}$$

Enfin, la distance de la galaxie d'Andromède vaut :

$$d_7 = \frac{2,1 \times 10^{22}}{9,5 \times 10^{15}} = 2,2 \times 10^6 \text{ a.l. ,}$$

ou encore :

$$d_7 = \frac{2,1 \times 10^{22}}{3,1 \times 10^{22}} = 0,68 \text{ Mpc.}$$

On pourra retenir que le kilomètre est une unité utilisée à l'échelle des planètes et des orbites de leur satellites, l'unité astronomique est l'unité utilisée dans les études des systèmes planétaires, le parsec pour décrire l'environnement proche du Soleil dans la Galaxie. Finalement, le mégaparsec est l'unité utilisée par les astronomes extra-galactiques. Quant à l'année-lumière, il s'agit essentiellement d'une unité « grand public », essentiellement utilisée en vulgarisation.

15 Voir dans le passé

Énoncé
p. 14

Lycée Henri IV, Paris

- 1 On voit que l'unité de distance utilisée dans l'énoncé fait intervenir le parsec (de symbole pc) précédé de la lettre G, laquelle signifie *giga* (voir le chapitre sur les puissances de dix), ce qui correspond à une multiplication par 10^9 . La distance de l'objet peut donc s'écrire encore :

$$d = 3,1 \times 3,26 \times 10^9 = 1,0 \times 10^{10} \text{ a.l.}$$

La distance de cette supernova est de dix milliards d'années-lumière. La lumière qui en est issue a donc mis dix milliards d'années pour nous parvenir : l'explosion a eu lieu il y a dix milliards d'années.

MÉTHODE

Notons que nous n'avons pas besoin d'évaluer cette distance dans une autre unité, et donc nous n'avons pas besoin de connaître la vitesse de la lumière dans le vide. Il suffit de connaître la définition de l'année-lumière pour répondre à cette question.

- 2 Cette explosion est plus de deux fois plus ancienne que la Terre, donc la Terre n'existait pas quand elle a eu lieu.

16 Système Solaire et Galaxie

Enoncé
p. 14

Lycée Claude Nicolas Ledoux, Besançon

Avant de répondre aux différentes questions, il est bon de déterminer une fois pour toute l'échelle de ce modèle, c'est-à-dire la quantité qui va nous dire combien de fois ce modèle est plus petit que la réalité.

Le diamètre du Soleil est :

$$D_S = 2 \times 696\,000 \approx 1,4 \times 10^6 \text{ km} = 1,4 \times 10^9 \text{ m.}$$

En revanche, le diamètre de son modèle est :

$$d_S = 1,4 \text{ cm} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

Le rapport entre ces deux grandeurs est donc :

$$r = \frac{D_S}{d_S} = 10^{11}.$$

Le modèle est donc 10^{11} (soit cent milliards) de fois plus petit que la réalité.

- 1 Le diamètre de la Terre est $D_T = 2R_T = 12\,756 \text{ km}$ donc le diamètre de son modèle est :

$$d_T = \frac{12\,756}{10^{11}} = 1,2756 \times 10^{-7} \text{ km} \approx 0,13 \text{ mm.}$$

Il faut la placer à une distance $d = \frac{D}{r}$ du modèle du Soleil, c'est-à-dire :

$$d = \frac{149\,597\,870}{10^{11}} \approx 1,5 \times 10^{-3} \text{ km} = 1,5 \text{ m.}$$

- 2 Il faut placer le modèle de Pluton 40 fois plus loin que le modèle de la Terre (puisque une unité astronomique représente précisément la distance Terre-Soleil). En conséquence, il faut placer le modèle de Pluton à 60 mètres de la bille « Soleil ».

- 3 La correspondance entre années-lumière et kilomètres n'est pas donnée dans l'énoncé. Cela suppose donc qu'il faut savoir la retrouver (c'est un calcul qu'il faut savoir effectuer rapidement, le cas échéant).

En une année, la lumière parcourt une distance : $d_{a.l.} = c \times T$, où c est la vitesse de la lumière (dans le vide) et T est la durée d'une année. En faisant l'application numérique, cela s'écrit :

$$d_{a.l.} = 3 \times 10^5 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \approx 9,5 \times 10^{12} \text{ km.}$$

En effet, il y a 365 jours dans une année, 24 heures dans une journée, 60 minutes dans une heure et 60 secondes dans une minute.

La plus proche étoile se trouve donc à une distance

$$D_* = 4 \times 9,5 \times 10^{12} = 3,8 \times 10^{13} \text{ km,}$$

et son modèle doit donc être placé à la distance :

$$d_* = \frac{D_*}{r} = \frac{3,8 \times 10^{13}}{10^{11}} = 380 \text{ km.}$$

Ainsi, si le modèle du Soleil se trouve à Paris, le modèle de la Terre étant une tête d'épingle orbitant à 1,5 mètres de la bille « Soleil », la *plus proche* étoile se trouve environ à la distance de Strasbourg ou Limoges...

- 4 La Galaxie a un diamètre $D_G = 9,5 \times 10^{12} \times 100\,000 = 9,5 \times 10^{17}$ km, donc le diamètre de son modèle est :

$$d_G = \frac{D_G}{r} = \frac{9,5 \times 10^{17}}{10^{11}} = 9,5 \times 10^6 \approx 10^7 \text{ km.}$$

Compte-tenu de la précision des données de l'énoncé nous ne conservons qu'un chiffre significatif. Le diamètre du *modèle* de la Galaxie est donc d'environ 10 millions de kilomètres. Cela représente tout de même 26 fois la distance de la Terre à la Lune.

17 Nébuleuse planétaire

Enoncé
p. 15

Lycée Louis Le Grand, Paris

- 1 Le nombre d'atomes qu'il y a dans l'étoile est égal à :

$$N = \frac{M_S}{m} = \frac{2,0 \times 10^{30}}{1,7 \times 10^{-27}} = 1,2 \times 10^{57} \text{ atomes.}$$

- 2 (a) Une année-lumière est la distance parcourue en un an par la lumière dans le vide. Dans les unités du Système International, elle vaut :

$$1 \text{ a.l.} = 3,0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 9,6 \times 10^{15} \text{ m.}$$

- (b) Le rayon R du nuage, dans les unités du Système International, vaut :

$$R = 0,5 \text{ a.l.} = 4,8 \times 10^{15} \text{ m.}$$

On en déduit le volume du nuage :

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 4,6 \times 10^{47} \text{ m}^3.$$

- (c) Dans le nuage, nous retrouvons un dixième du nombre total des atomes de l'étoile, soit un nombre $N' = N/10$:

$$N' = 1,2 \times 10^{56} \text{ atomes.}$$

- (d) Convertissons le volume du nuage en centimètres cube. Un mètre représente 10^2 centimètres, donc un mètre cube représente $(10^2)^3 = 10^6$ centimètres cube. Le volume du nuage vaut donc :

$$V = 4,6 \times 10^{47} \times 10^6 = 4,6 \times 10^{53} \text{ cm}^3.$$

Le nombre moyen n de particules que l'on trouve dans le nuage est donc :

$$n = \frac{N'}{V} = \frac{1,2 \times 10^{56}}{4,6 \times 10^{53}} \approx 261 \text{ particules.cm}^{-3}.$$

- (e) Cette valeur est du même ordre de grandeur, et légèrement inférieure, au taux de particules mesuré dans les meilleurs vides terrestres. On se rend compte ici à quel point l'espace est vide entre les objets astronomiques. La nébuleuse planétaire que nous venons de caractériser est un objet beaucoup plus dense que l'environnement dans laquelle elle s'étend, et pourtant la quantité de particules que l'on y trouve par unité de volume est similaire à celles des meilleurs vides de laboratoire terrestres.

18 Les étoiles sont-elles des Soleils ?

→ Enoncé
p. 16

Lycée Thérèse d'Avila, Lille

Si on plaçait l'étoile Véga à la distance du Soleil, alors elle serait 1,4 millions (soit $1,4 \times 10^6$) fois plus proche, et elle serait donc, d'après l'indication donnée dans l'énoncé, $(1,4 \times 10^6)^2$ fois plus brillante qu'elle ne l'est actuellement.

Le rapport de sa luminosité apparente à celle du Soleil serait donc :

$$\frac{L_{\text{Véga}}}{L_{\text{Soleil}}} = \frac{1}{63 \times 10^9} \times (1,4 \times 10^6)^2 = 31.$$

L'étoile Véga est donc intrinsèquement 31 fois plus lumineuse que le Soleil. Notons que la plupart des étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel sont au moins aussi brillantes intrinsèquement que le Soleil. En revanche, 90 % des étoiles de notre galaxie sont moins brillantes que ce dernier. Ce paradoxe apparent est lié au fait qu'il y a un effet de sélection sur les étoiles visibles à l'œil nu. À une distance donnée, on a tendance à voir les étoiles les plus brillantes intrinsèquement.

Le Soleil est une étoile tout-à-fait banale.

19 Supernova de Tycho Brahé

→ Enoncé
p. 16

Lycée Louis le Grand, Paris

- 1 Une journée comporte $3\,600 \times 24 = 86\,400$ secondes, donc la distance d_J parcourue par la lumière en une journée est :

$$d_J = 86\,400 \times 3,0 \times 10^8 = 2,6 \times 10^{13} \text{ m.}$$

- 2 Une année comporte 365 jours, donc la distance d_A parcourue par la lumière en une année (appelée année-lumière ou année de lumière) vaut :

$$d_A = 365 \times d_J = 9,5 \times 10^{15} \text{ m.}$$

- 3 La distance de la radiosource 3C10, exprimée en années-lumière, est

$$d' = \frac{d}{d_A} = \frac{8,5 \times 10^{19}}{9,5 \times 10^{15}} = 8,9 \times 10^3 \text{ années-lumière.}$$

- 4 L'explosion a été observée en 1572. Les rayons lumineux issus de la source ont voyagé, en vertu de la question précédente, durant 8 900 ans avant de nous parvenir. L'explosion n'a donc pas eu lieu en 1572 (si c'était le cas, on ne pourrait pas encore l'observer !).
- 5 L'explosion a donc eu lieu aux alentours de la date $1572 - 8\,900 = -7\,328$. Compte-tenu de la précision de la distance, on ne garde que deux chiffres significatifs : l'explosion a lieu aux alentours de l'an 7300 avant J.C. Puisque la distance a été obtenue avec deux chiffres significatifs, on connaît la distance à 100 années-lumière près, et donc la date d'explosion à 100 ans près.

20 Manipuler les puissances de dix

Enoncé
p. 16

Lycée Ernest Renan, Saint-Brieuc

Il faut au préalable calculer dans cet exercice la correspondance entre années-lumière et kilomètres, qui n'est pas donnée dans l'énoncé.

En une année, la lumière parcourt une distance : $d_{a.l.} = c \times T$, où c est la vitesse de la lumière (dans le vide) et T est la durée d'une année. En faisant l'application numérique, cela s'écrit :

$$d_{a.l.} = 3 \times 10^5 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \approx 9,5 \times 10^{12} \text{ km.}$$

En effet, il y a 365 jours dans une année, 24 heures dans une journée, 60 minutes dans une heure et 60 secondes dans une minute.

Le rayon de l'Univers observable, en kilomètres, vaut donc :

$$R_U = 15 \times 10^9 \times d_{a.l.} \approx 1,4 \times 10^{23} \text{ km.}$$

Dans la même unité, le rayon du noyau atomique est :

$$R_N = 2 \times 10^{-15} \times 10^{-3} = 2 \times 10^{-18} \text{ km}$$

puisque cette grandeur est donnée en mètres dans l'énoncé.

Les volumes respectifs sont donc :

$$\begin{cases} V_U = \frac{4}{3}\pi R_U^3 \approx 1,2 \times 10^{70} \text{ km}^3 \\ V_N = \frac{4}{3}\pi R_N^3 \approx 3,4 \times 10^{-53} \text{ km}^3 \end{cases}$$

En divisant entre elles ces égalités, on obtient :

$$\frac{V_U}{V_N} = \left(\frac{R_U}{R_N} \right)^3 = \left(\frac{1,4 \times 10^{23}}{2 \times 10^{-18}} \right)^3 = (7 \times 10^{40})^3 \approx 3,4 \times 10^{122}$$

21 Temps lumière

Énoncé
p. 17

Lycée d'Arsonval, Brive

- 1 L'année de lumière (ou année-lumière) est la distance parcourue par la lumière en un an dans le vide.
- 2 Un mois-lumière serait la distance parcourue par la lumière en un mois dans le vide. Dans l'unité du Système International (c.-à-d. en mètres) elle vaut :

$$3,0 \times 10^8 \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 = 7,8 \times 10^{14} \text{ m.}$$

- 3 1 seconde-lumière = $3,00 \times 10^8 \times 1 = 3,00 \times 10^8 \text{ m.}$

$$d(\text{Jupiter-Callisto}) = \frac{1,88 \times 10^6 \times 10^3}{3,00 \times 10^8} = 6,3 \text{ secondes-lumière.}$$

- 4 On calcule le temps t que met la lumière pour parcourir la distance $D = 19,0 \times 10^9 \text{ km}$, puis on la convertit en heures :

$$t = \frac{D}{c} = \frac{19,0 \times 10^9 \times 10^3}{3,00 \times 10^8} = 6,3 \times 10^4 \text{ s} = \frac{6,33 \times 10^4}{3\,600} = 17,6 \text{ h.}$$

La sonde Voyager 1 se trouve à 17,6 heures-lumière de la Terre.

MÉTHODE

Il faut prendre garde à convertir la distance D en mètres, puisque l'on divise par des mètres par seconde. Nous gardons trois chiffres significatifs, compte-tenu de la précision des indications de l'énoncé.

- 5 (a) Nous exprimons en secondes le temps que met la lumière pour parcourir la distance d :

$$T = \frac{d}{c} = \frac{51 \times 10^6 \times 10^3}{3,00 \times 10^8} = 1,7 \times 10^2 \text{ s.}$$

Dans la configuration donnée dans l'énoncé, Mars se trouve à 170 secondes-lumière de la Terre.

- (b) Il faut que l'ordre (transmis par des ondes électromagnétique, donc à la vitesse de la lumière) arrive à la sonde, puis que les nouvelles images prises par celle-ci nous parviennent. Le temps demandé est donc le temps d'un aller-retour de la distance d . L'ingénieur voit les nouvelles images prises par la sonde au bout de $2 \times 170 = 340 \text{ s}$, c'est-à-dire au bout de 5 minutes et quarante secondes.

Ondes et signaux périodiques - Mesures

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Notions de base sur l'oscilloscope
4. Ondes sonores et électromagnétiques

Thèmes : la santé, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Franco-Mexicain, Mexico

Un générateur basse fréquence (GBF) délivre une tension sinusoïdale de fréquence $f = 250 \text{ Hz}$, d'amplitude $U_{\max} = 1 \text{ V}$. La tension est visualisée à l'oscilloscope électronique utilisé en mode balayage.

La sensibilité verticale de l'oscilloscope est de $0,5 \text{ V.div}^{-1}$.

La base de temps de l'oscilloscope est de 1 ms.div^{-1} .

- 1 Calculer les déviations extrêmes du spot.
- 2 Calculer la période de la tension analysée.
- 3 Calculer le nombre de divisions correspondant à une période.
- 4 En déduire l'allure de la courbe observée sur l'écran de l'oscilloscope, sachant qu'il comporte 10 divisions horizontalement et 8 verticalement.

Voir corrigé page 39

Ce chapitre introduit la notion de signaux périodiques. Il présente l'un des outils d'étude de tels signaux : l'oscilloscope. Enfin, sont abordées les notions d'ondes sonores et électromagnétiques.

2 Définitions

Définition 1

Un phénomène est dit périodique quand il se reproduit identiquement à lui-même à des intervalles de temps réguliers.

Exemple : le balancier d'une pendule, qui revient à la même place toutes les deux secondes, le mouvement de la Terre autour du Soleil, qui revient à la même place, après avoir fait un tour, tous les ans, ou la vibration de la membrane d'un haut-parleur produisant une note donnée (un « la » par exemple).

Définition 2

On appelle période, notée T , l'intervalle de temps nécessaire pour que le phénomène se reproduise identiquement à lui-même. L'unité du Système International pour la mesure de la période est la seconde, de symbole s.

Ainsi, dans l'exemple précédent, la période du balancier est de 2 secondes. Un signal périodique peut également être caractérisé par sa fréquence, notée f , qui représente le nombre de répétitions du phénomène par unité de temps. Dans le Système International, les fréquences s'expriment en hertz (Hz). Ainsi, une fréquence de 5 Hz signifie que le phénomène décrit 5 cycles par seconde.

À RETENIR

Entre la fréquence f et la période T d'un phénomène périodique, on a la relation :

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

La fréquence correspond au nombre de périodes par seconde.

Exemple : Un signal de fréquence 50 Hz est un signal qui se reproduit 50 fois identique à lui-même par seconde.

On utilise aussi fréquemment le kilohertz (symbole kHz ; 1 kHz = 10^3 Hz), le mégahertz (symbole MHz ; 1 MHz = 10^6 Hz), et le gigahertz (symbole GHz ; 1 GHz = 10^9 Hz).

Exemple : Un signal périodique a pour période $T = 0,2$ ms. Cherchons sa fréquence. Il faut veiller ici à convertir tout d'abord cette période en secondes. On a : $T = 2 \times 10^{-4}$ s, donc la fréquence f est donnée par :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^3 \text{ Hz} = 5 \text{ kHz}.$$

On aurait pu prendre l'inverse directement mais il aurait alors fallu prendre garde au fait que l'on aurait obtenu des kilohertz : l'inverse d'une période en milliseconde est une fréquence en kilohertz, l'inverse d'une période en microseconde est une fréquence en mégahertz, et réciproquement.

Notions de base sur l'oscilloscope

L'oscilloscope est un dispositif qui permet de visualiser une tension électrique variable et périodique. Les premiers oscilloscopes comprenaient un canon à électrons, qui donnait lieu à un *spot* lumineux à l'endroit où il venait frapper l'écran. Le faisceau d'électrons pouvait être dévié horizontalement et verticalement par l'application de tensions électriques sur des paires d'électrodes.

Notons que les oscilloscopes modernes sont numériques et fonctionnent sur un principe différent. Tous les réglages et techniques de lecture des signaux restent néanmoins les mêmes.

Pour visualiser un signal périodique, on utilise l'oscilloscope en mode balayage : le spot balaie alors horizontalement l'écran au cours du temps, et la tension périodique à visualiser est utilisée pour le dévier verticalement.

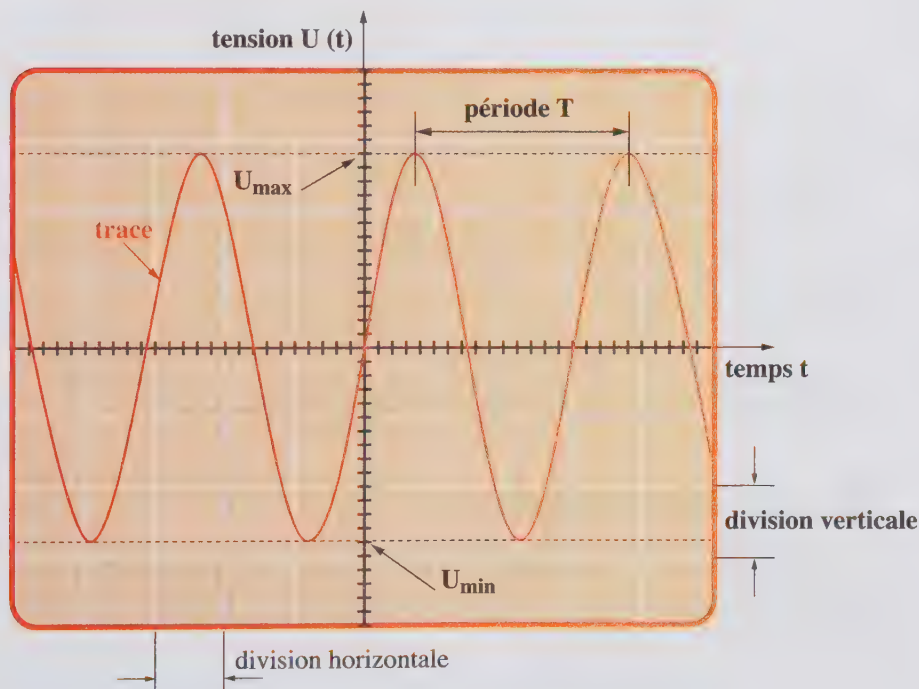


Figure 2.1 – La trace de l'oscilloscope donne une représentation de la tension en fonction du temps.

Le spot balaie l'écran de gauche à droite à une vitesse que l'on peut régler sur l'oscilloscope. Celle-ci s'exprime en unité de temps par division, et est appelée base de temps.

La figure ci-dessus donne l'exemple de l'analyse d'un signal périodique de forme sinusoïdale. On peut mesurer la période, qui est égale au nombre de divisions que met le signal à redevenir identique à lui-même (ici environ 3,1), multiplié par la base de temps.

La tension maximale $U_{\max}$ (resp. minimale $U_{\min}$) est la plus grande (resp. petite) valeur atteinte par la tension variable au cours d'une période.

L'oscilloscope, associé à un microphone, peut permettre d'étudier le comportement temporel d'un signal sonore. En effet, le microphone convertit le signal sonore en une tension variable, que l'on peut ensuite analyser avec l'oscilloscope, comme le montre la figure ci-dessous.

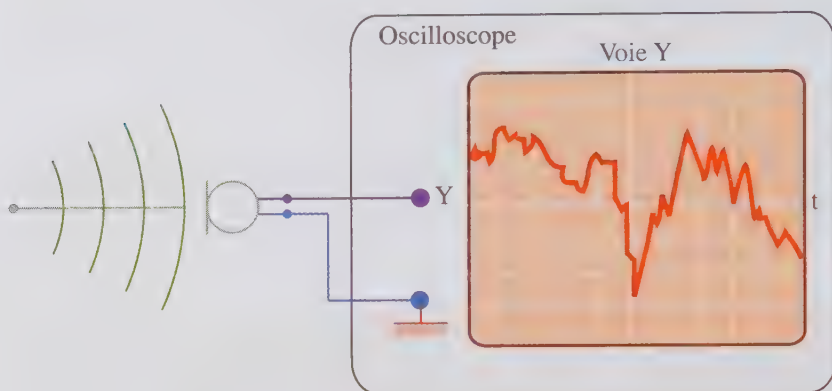


Figure 2.2 – Allure de la tension variable aux bornes du microphone.

L'électrocardioscope, qui permet d'enregistrer des tensions liées à l'activité cardiaque, repose sur le même principe que l'oscilloscope, et permet de visualiser ces tensions sur un écran.

4 Ondes sonores et électromagnétiques

4.1 Notion d'onde et propagation

Une onde correspond à la transmission de proche en proche d'une perturbation vibratoire, à une certaine vitesse (encore appelée célérité), et n'est pas accompagnée d'un mouvement global de matière.

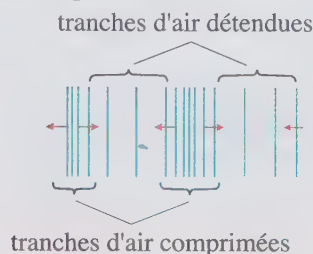
Exemple : la houle est une onde. La perturbation vibratoire est ici le mouvement oscillant de la surface de la mer. Il n'y a pas de mouvement global de matière : si on considère un bouchon à la surface de la mer agitée par la houle, à part ses oscillations liées à la houle, il n'a pas de mouvement d'ensemble et il ne se déplace pas vers la direction où se propage la houle.

À RETENIR

La vitesse à laquelle une onde se propage est appelée célérité.

4.2 Ondes sonores

Les sons correspondent à des vibrations des tranches du milieu dans lequel ils se propagent. La propagation a lieu parce que ces vibrations occasionnent des petites variations locales de pression (*compressions* et *détentes* alternatives), qui à leur tour engendrent le mouvement des couches voisines, etc. Ainsi, une *onde sonore* se propage de proche en proche.



Ainsi, on voit que :

- L'onde sonore, pour se propager, a besoin d'un support matériel : le son ne se propage pas dans le vide.
- La propagation de l'onde fait intervenir des petits mouvements de la matière autour d'une position moyenne, mais pas de déplacement global : il n'y a pas de déplacement de matière lors du passage de l'onde.
- En revanche, la propagation de l'onde s'accompagne d'un transfert d'énergie, puisque les vibrations de la matière nécessitent de l'énergie, et que ces vibrations se transmettent de proche en proche.

La célérité du son dans l'air dans les conditions normales de température et de pression est $c_s = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

4.3 Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques, au contraire des ondes sonores qui ne peuvent exister que dans les milieux matériels, peuvent se propager dans le vide. La nature des perturbations vibratoires qui lui sont associées est totalement hors-programme, et ne sera pas abordée avant le baccalauréat.

Dans le vide, la célérité des ondes électromagnétiques est égale à

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}.$$

On pourra retenir que $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

Domaines de fréquence des ondes sonores

Les ondes sonores audibles ont des fréquences comprises entre 20 Hz (pour les sons les plus graves) et 20 kHz (pour les sons les plus aigus). Les ondes sonores de plus basse fréquence sont appelées les infrasons (perçus par exemple par de grands mammifères comme les éléphants), et les ondes sonores de plus haute fréquence sont appelées les ultrasons (perçus par exemple par certains insectes).

Technique de l'écho

Pour mesurer la distance d d'un objet, on peut envoyer une onde dans sa direction. Si cette onde est réfléchiée, la mesure de l'intervalle de temps Δt séparant l'émission de la réception est égale au temps d'aller-retour entre l'expérimentateur et l'objet, à la vitesse v de l'onde :

$$\Delta t = \frac{2d}{v}$$

donc, si on connaît v , on peut estimer d par :

$$d = \frac{v\Delta t}{2}.$$

Cette méthode de l'écho est utilisée pour mesurer la profondeur d'un sous-marin (écho d'ultrasons, qui sont des ondes sonores), ou pour mesurer la distance d'astres proches (Vénus, la Lune) par la technique de l'écho radar. Nous verrons ces applications en exercices. En outre, elle est utilisée en médecine : l'écho d'ondes ultrasonores par les organes à l'intérieur du corps humain permet d'obtenir, grâce à l'utilisation d'une sonde échographique.

La lumière visible : un cas particulier d'ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques peuvent avoir des fréquences très diverses, ainsi que nous le reverrons dans un chapitre ultérieur, et couvrent un grand ensemble de domaines (ondes radio, infrarouges, etc.). Les ondes électromagnétiques ayant dans le vide une longueur d'onde comprise entre 380 nm et 780 nm, sont perçues par l'œil, et correspondent à l'ensemble des ondes visibles ou ondes lumineuses. La célérité des ondes électromagnétiques est donc aussi appelée vitesse de la lumière.

Solution de l'exercice type

Lycée Franco-Mexicain, Mexico

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 Au maximum, la tension d'entrée vaut 1 V en valeur absolue, ce qui correspond à $\frac{1}{0,5} = 2$ divisions. Le spot dévie donc au plus de deux divisions vers le haut ou vers le bas.

2 La période de la tension analysée est :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{250} = 0,004 \text{ s} = 4 \text{ ms.}$$

3 Il y a donc $\frac{4}{1} = 4$ divisions par période du signal.

4 Les indications données ci-dessus permettent de tracer la courbe suivante :

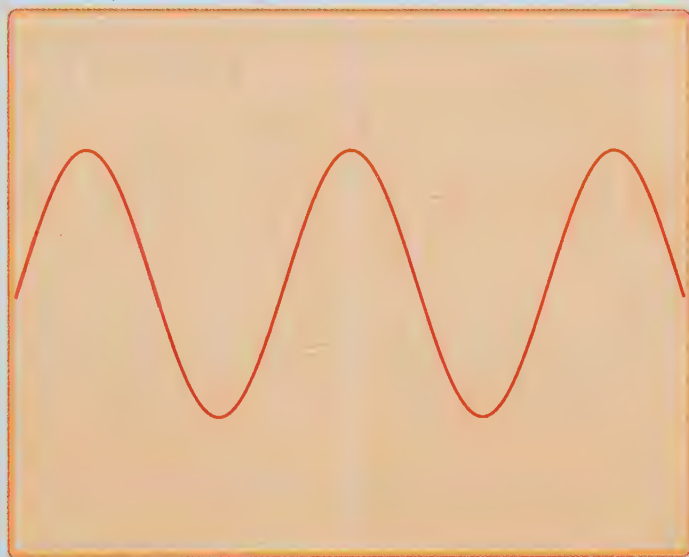


Figure 2.3 – Allure de la tension en fonction du temps.

Voir énoncé page 33

1 OKM Testez vos connaissances

5 min

 ➔ Corrigé
p. 47

- 1 Lorsque l'on mesure un rythme cardiaque en « prenant le pouls » de quelqu'un (c'est-à-dire en comptant le nombre de pulsations perçues durant un intervalle de temps donné), on mesure :
☐ a une période ☐ b une fréquence
- 2 Plus la fréquence du signal à étudier est grande, plus la base de temps de l'oscilloscope doit être :
☐ a petite ☐ b grande
- 3 Les sondes échographiques utilisent :
☐ a des ultrasons ☐ b des ondes électromagnétiques
- 4 Les sondes échographiques utilisent des ondes sonores de fréquence plus élevée que les ondes sonores audibles. Leur période est donc :
☐ a plus courte ☐ b plus grande
 que celle des ondes sonores audibles.

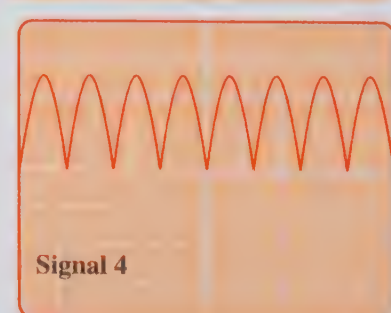
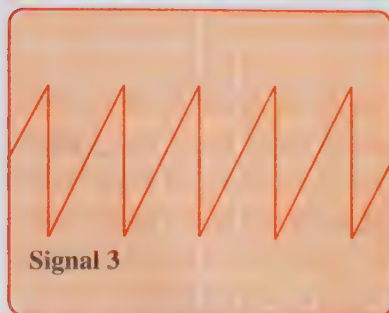
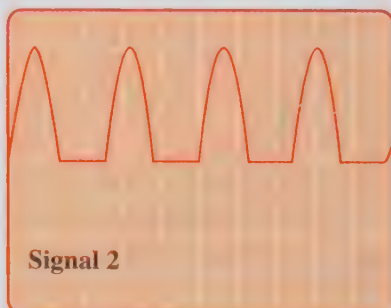
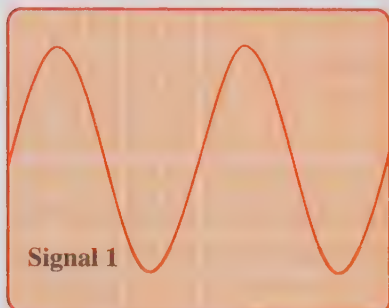
2 OKM Oscilloscope

5 min

 ➔ Corrigé
p. 47

Partie A

On considère les oscillogrammes suivants. La base de temps, la sensibilité et le réglage du zéro de l'oscilloscope sont les mêmes pour chacun.



- 1 Les signaux 2 et 3 ont même période
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 2 Les signaux 2 et 3 ont même tension maximale
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 3 Les signaux 2 et 4 ont même tension minimale
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 4 Le signal 2 n'est pas périodique
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 5 Les signaux 1, 2 et 4 sont des signaux sinusoïdaux
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 6 Les signaux 3 et 4 sont des signaux en dents de scie
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 7 Les signaux 2 et 4 ont même période, donc même fréquence
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 8 Les signaux 1 et 2 ont même tension maximale
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 9 La fréquence du signal 1 est égale
☐ a au double ☐ b à la moitié
 de la fréquence du signal 2.

Partie B

- 1 On observe une tension sinusoïdale sur l'écran d'un oscilloscope. Si l'on diminue de moitié la valeur de la base de temps, la période du signal observé :
☐ a double ☐ b diminue de moitié ☐ c ne change pas
- 2 L'écran de l'oscilloscope a pour largeur 10 divisions et pour hauteur 8 divisions. En mode balayage avec le coefficient 5 ms.div^{-1} , le spot met, pour traverser l'écran :
☐ a 50 ms ☐ b 40 ms ☐ c 5 ms

3 V/F Principe de l'échographie

10 min

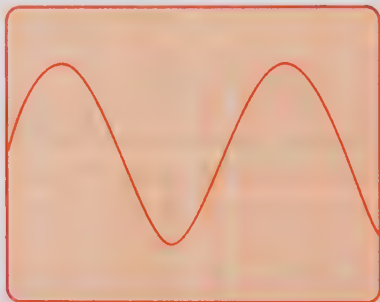
Corrigé
p. 48

Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes. Dans le cas où l'on répond « faux », indiquer quelle serait l'affirmation correcte.

- 1 Une sonde échographique émet des ondes ultrasonores.
- 2 Une sonde échographique reçoit des ondes ultrasonores.
- 3 Une sonde échographique émet des rayons X.
- 4 Les ondes que reçoit une sonde échographique sont émises par les organes du patient.
- 5 Le gel que l'on met entre la sonde échographique et la peau du patient sert à protéger cette dernière.
- 6 L'échographie est un acte médical douloureux.
- 7 L'échographie permet de restituer la vraie couleur des différents organes.

4 V/F Utilisation d'un oscilloscope

10 min

Corrigé
p. 48

On branche un oscilloscope aux bornes d'un oscillateur utilisé dans une horloge électronique. On observe l'oscillogramme ci-dessus. Les réglages de l'oscilloscope sont :

- Base de temps : $50 \mu\text{s}.\text{div}^{-1}$.
- Sensibilité verticale : $2 \text{ V}.\text{div}^{-1}$.

Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes. Dans chaque cas, justifier la réponse en trois lignes maximum.

- 1 La tension a une fréquence de 330 Hz.
- 2 Pour diminuer la fréquence de la tension, il faut augmenter la base de temps de l'oscilloscope.
- 3 Pour observer trois périodes de la tension sur l'écran de l'oscilloscope, il faudrait régler le balayage sur $0,1 \text{ ms}.\text{div}^{-1}$.

5 Étude d'un oscillogramme

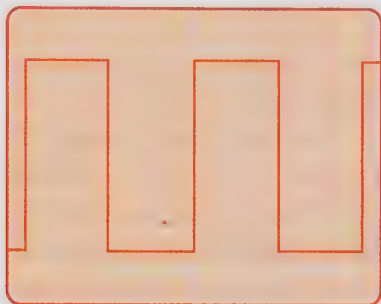


10 min

Corrigé
p. 49

Lycée Carnot, Dijon

On observe sur l'écran d'un oscilloscope la tension variable représentée ci-dessous.



Avant d'appliquer cette tension, l'oscilloscope a été réglé de façon que la trace soit sur l'axe médian de l'écran.

- 1 Quelles sont les caractéristiques de la tension observée ? On donnera quatre adjectifs qualificatifs.
- 2 La base de temps est de $0,5 \text{ ms.div}^{-1}$. La sensibilité verticale est de 2 V.div^{-1} . En déduire la période, la fréquence et l'amplitude de cette tension variable.

6 Chauve-souris



5 min

Corrigé
p. 49

Lycée Robert Doisneau, Corbeil-Essonnes

Une chauve-souris, pour repérer les obstacles ou ses proies, émet des ultrasons dont la fréquence limite est 120 kHz .

- 1 Rappeler ce qu'est un ultrason.
- 2 Lorsque la chauve-souris est à une distance $d = 1,0 \text{ m}$ d'un obstacle, quel est l'intervalle de temps t séparant l'émission de la salve d'ultrasons et sa réception ?

Donnée : célérité du son : $c_s = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

7 Sous-marin



5 min

Corrigé
p. 49

Lycée Marie Curie, Versailles

Pour mesurer à quelle distance du fond se trouve un sous-marin immobile, on envoie à la verticale vers le fond un faisceau d'ultrasons. On capte un signal réfléchi $0,73 \text{ s}$ après l'émission. À quelle distance du fond se trouve le sous-marin, sachant que la célérité du son dans l'eau vaut $c_s = 1\,500 \text{ m.s}^{-1}$?

8 Vitesse du son

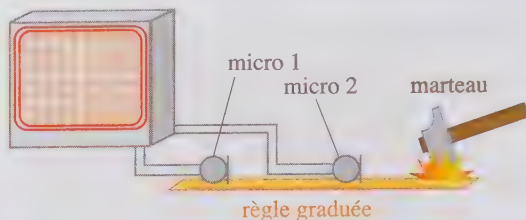


5 min

Corrigé
p. 50

Lycée Gustave Eiffel, Cachan

On réalise l'expérience représentée à la figure ci-dessous.



L'oscilloscope est un oscilloscope à mémoire, qui se déclenche quand un signal est détecté sur la voie 2, et qui garde à l'écran les traces obtenues.

1 Comment mesurer la vitesse du son grâce à ce type d'expérience ?

2 On obtient les traces suivantes :



La base de temps est $0,5 \text{ ms.div}^{-1}$. Les microphones sont distants de 78 cm. Quelle est la vitesse du son ?

9 Distance d'un éclair



5 min

Corrigé
p. 50

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

Pour connaître la distance d à laquelle tombe la foudre, on mesure la durée qui sépare l'instant où l'on voit l'éclair et l'instant où l'on entend le tonnerre. Le son se propage à la célérité $c_s = 342 \text{ m/s}$ et on considère que la propagation de la lumière est quasi instantanée. On trouve un délai $\Delta t = 4,6 \text{ s}$.

À quelle distance est tombée la foudre ?

10 Ondes sonores



10 min

Corrigé
p. 50

Lycée Jean Sturm, Strasbourg

Sur un conduit en fonte contenant de l'eau, on place un capteur de pression. Un coup est donné sur le conduit, à une distance d du capteur. On détecte deux signaux, séparés par un intervalle de temps $t = 0,46 \text{ s}$. Que vaut la distance d ?

Données :

- Vitesse du son dans l'eau : $c_1 = 1\,500 \text{ m.s}^{-1}$
- Vitesse du son dans la fonte : $c_2 = 5\,000 \text{ m.s}^{-1}$

11 Distance de Vénus par écho radar

★★

5 min

Corrigé
p. 51

Lycée Jules-Ferry, Paris

Pour mesurer la distance de la planète Vénus, on y envoie un fort signal en ondes radio avec le radiotélescope d'Arecibo. On capte un signal réfléchi 5 minutes et 47,02 secondes après l'émission. À quelle distance, en kilomètres, se trouve Vénus ?

Donnée : $c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

12 Électrocardiogramme

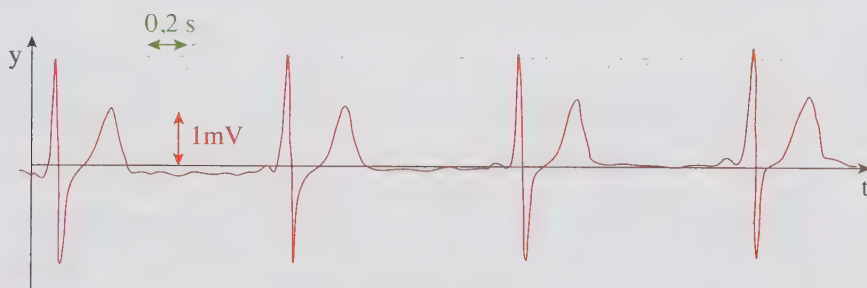
★★

15 min

Corrigé
p. 51

Lycée Voltaire, Paris

L'électrocardiogramme d'un patient est donné sur la figure ci-dessous.



- 1 Sur la durée de l'enregistrement, le signal peut-il être considéré comme périodique ? Justifier.
- 2 Si oui, déterminer graphiquement la période T des pulsations cardiaques de ce patient.
- 3 Calculer la fréquence f de ce phénomène périodique, en hertz.
- 4 En déduire le nombre de battements par minute, appelé *rythme cardiaque*.

13 Sonde échographique

★★★

20 min

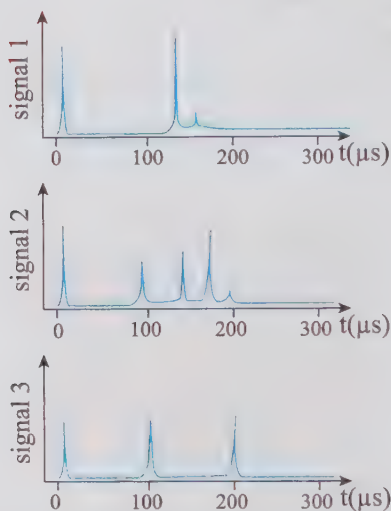
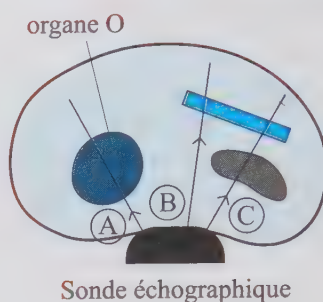
Corrigé
p. 52

Lycée Stanislas, Paris

On considère l'examen par échographie des organes représentés schématiquement sur la partie gauche de la figure mise sur la page suivante.

La sonde échographique est composée de transducteurs qui envoient des salves d'ultrasons. Pour simplifier nous supposons que chaque transducteur envoie une salve dans une direction qui lui est propre, et capte les ultrasons de cette salve réfléchis par les différents organes.

Les trois transducteurs A, B et C donnent lieu aux courbes de réponse de la partie droite de la figure. Le premier pic correspond à l'émission d'une salve d'ultrasons, et les pics suivants à la réception d'un signal réfléchi par le transducteur.



- 1 Identifier à quel transducteur correspondent respectivement chacun des signaux réfléchis.
- 2 Sachant que la vitesse du son dans les tissus mous est de l'ordre de $c_s = 1\,650\text{ m.s}^{-1}$, indiquer quel est le diamètre de l'organe O.
- 3 Les parties du corps humain qui réfléchissent le mieux les ultrasons sont les os. Indiquer lequel des organes de la figure peut être un os.
- 4 La salve émise dure $10\text{ }\mu s$. Quelle est la longueur du train d'ondes émis dans l'abdomen ? Sachant que ce train d'ondes comporte 30 périodes de l'onde, quelle est la fréquence des ultrasons émis par la sonde échographique ?
- 5 À votre avis, pourquoi le dernier pic sur les signaux 1 et 2 a-t-il une faible intensité ?

1 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 40

- 1 Réponse **b** : on obtient une fréquence (généralement en battements par minute). Il suffit pour s'en convaincre de constater qu'il augmente lorsque la période entre les battements cardiaques diminue.
- 2 Réponse **a**. Plus la fréquence du signal est grande, plus sa période est petite, et donc plus la base de temps doit être petite pour qu'une période apparaisse clairement sur l'écran.
- 3 Réponse **a** : elles utilisent des ultrasons.
- 4 Réponse **a** : leur période est plus courte.

2 QCM Oscilloscope

➔ Enoncé
p. 40

Partie A

- 1 **b**. On voit sur l'écran que la période du signal 2 est de 2,5 divisions, alors que celle du signal 3 est de 2 divisions. Comme la base de temps est la même sur ces deux oscillogrammes, les signaux ont des périodes différentes.
- 2 **b**. La déviation maximale du spot est de 3 divisions pour le signal 2, et de deux divisions seulement pour le signal 3. Comme la sensibilité est la même pour ces deux oscillogrammes, les tensions maximales sont différentes.
- 3 **a**. Tous deux ont une tension minimale égale à zéro.
- 4 **b**. Ce signal est périodique, puisqu'il se répète identique à lui-même toutes les 2,5 divisions.
- 5 **b**. Seul le signal 1 est sinusoïdal.
- 6 **b**. Seul le signal 3 est en dents de scie.
- 7 **b**. Ils n'ont pas la même période (et par conséquent pas la même fréquence). Le signal 4 se répète identique à lui-même toutes les 1,25 divisions. Sa période est deux fois plus petite que celle du signal 2.
- 8 **a**. La déviation maximale du spot est dans les deux cas de trois divisions. La sensibilité étant la même, ils ont même tension maximale.
- 9 **b**. La période du signal 1 correspond à cinq divisions, tandis que celle du signal 2 correspond à 2,5 divisions. La base de temps étant la même, on en déduit que la période du signal 1 est deux fois plus grande que celle du signal 2, et que par conséquent sa fréquence est deux fois plus petite.

Partie B

- 1 Il s'agit bien sûr de **c**. En effet, un oscilloscope *n'a pas d'effet* sur le signal observé, et donc le fait de modifier les réglages n'affecte absolument pas la période du signal observé, même si l'aspect de la courbe sur l'écran change.
- 2 La réponse correcte est **a**. En effet, le spot traverse *horizontalement* l'écran, et doit donc parcourir 10 divisions. Il met 5 ms pour en parcourir une, donc il met $10 \times 5 = 50$ ms pour en parcourir 10. La hauteur de l'écran était une donnée inutile.

3 V/F Principe de l'échographie

➔ Enoncé
p. 42

- 1 *Vrai.*
- 2 *Vrai.*
- 3 *Faux.* La technique de l'échographie n'a rien à voir avec celle de la radiographie, qui elle utilise les rayons X.
- 4 *Faux.* Les ondes (ultrasonores) que reçoit la sonde échographique sont émises par elle-même, et sont *réfléchies* par les organes du patient.
- 5 *Faux.* Le gel sert à faciliter le passage des ondes ultrasonores vers l'intérieur du corps du patient, en abaissant le taux de réflexion des ondes sur la peau.
- 6 *Faux.* L'échographie est un acte médical indolore. Le patient ne ressent en aucune manière la présence des ondes ultrasonores.
- 7 *Faux.* La couleur des organes dépend de la manière dont ils diffusent ou réfléchissent les différentes radiations du spectre visible. La technique de l'échographie ne fait en aucun cas appel à des ondes électromagnétiques, et l'on ne peut obtenir qu'une coupe en noir et blanc des organes. Toutefois, on peut envisager un codage en *fausses couleurs* des images, pour faire ressortir un organe particulier, ou pour caractériser un flot sanguin, etc.

4 V/F Utilisation d'un oscilloscope

➔ Enoncé
p. 42

- 1 *Faux.* La période de la tension est de 6 divisions (lecture sur l'écran) soit $6 \times 50 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-4}$ s.
La fréquence correspondante est $\frac{1}{3 \times 10^{-4}} = 3\,300$ Hz.
- 2 *Faux.* Les réglages de l'oscilloscope ne peuvent avoir *aucune influence* sur le circuit étudié.
- 3 *Vrai.* Pour observer trois périodes, il faut que la largeur de l'écran corresponde à $3 \times 3 \times 10^{-4} \approx 10^{-3}$ s = 1 ms. Comme il y a dix divisions sur la largeur de l'écran, cela correspond bien à $0,1 \text{ ms} \cdot \text{div}^{-1}$.

5 Étude d'un oscillogramme

→ Enoncé
p. 43

Lycée Carnot, Dijon

- 1 La tension observée est une tension variable alternative, périodique et rectangulaire.
- 2 On constate sur l'oscillogramme que la période de la tension est de 4,5 divisions. Or une division représente 0,5 ms, étant donnée la valeur de la base de temps. Donc la période de la tension observée est :

$$T = 0,5 \times 4,5 = 2,25 \text{ ms}$$

et la fréquence correspondante :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,25} \approx 0,44 \text{ kHz} = 440 \text{ Hz.}$$

Quant à l'amplitude $U_{\max}$, elle se calcule par la formule suivante :

amplitude = amplitude observée (en divisions) $\times$ sensibilité ,

soit ici :

$$U_{\max} = 2,5 \times 2 = 5 \text{ V.}$$

car la courbe observée dévie de $\pm 2,5$ divisions, verticalement, par rapport à l'axe des abscisses.

6 Chauve-souris

→ Enoncé
p. 43

Lycée Robert Doisneau, Corbeil-Essonnes

- 1 Les ultrasons sont des ondes sonores dont la fréquence est supérieure à la fréquence maximale audible par l'oreille humaine. Les ultrasons se propagent donc à la vitesse du son.
- 2 La salve d'ultrasons doit effectuer un aller-retour entre la chauve-souris et l'obstacle, donc elle doit parcourir la distance $2d$. Elle met pour cela un temps :

$$t = \frac{2d}{c_s} = \frac{2,0}{340} = 5,9 \times 10^{-3} \text{ s} = 5,9 \text{ ms.}$$

On garde deux chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle sont données la distance et la célérité du son dans l'énoncé. Le délai séparant émission et réception est donc de 5,9 millisecondes.

7 Sous-marin

→ Enoncé
p. 43

Lycée Marie Curie, Versailles

Soit d la distance à laquelle le sous-marin se trouve du fond. Le signal réfléchi a parcouru deux fois cette distance d (un aller vers le fond et un retour du fond) sur l'intervalle de temps $\Delta t = 0,73 \text{ s}$. On doit donc écrire :

$$2d = c_s \times \Delta t ,$$

soit :

$$d = \frac{c_s \times \Delta t}{2} = \frac{0,73 \times 1\,500}{2} \approx 550 \text{ m.}$$

8

Vitesse du son

Enoncé
p. 44

Lycée Gustave Eiffel, Cachan

- 1 Le signal sonore issu du marteau va arriver aux microphones 1 et 2 à des instants différents, puisque ces deux récepteurs ne sont pas à la même distance de l'origine du bruit.

Il faut donc mesurer le délai t qui sépare la réception du son par les deux microphones, et la distance d qui les sépare grâce à la règle graduée, pour en déduire la vitesse du son dans l'air ($c_s = \frac{d}{t}$).

Le délai se mesure en regardant la distance entre les traces des deux voies, et en multipliant par la base de temps.

- 2 On constate que les deux traces montent (ce qui correspond à la réception du signal sonore) à 4,5 divisions d'intervalle, ce qui correspond à un délai qui s'écrit, compte-tenu de la base de temps :

$$t = 4,5 \times 0,5 \times 10^{-3} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

C'est donc le temps que met le son pour parcourir la distance $d = 0,78 \text{ m}$, ce qui permet d'écrire :

$$c_s = \frac{d}{t} = \frac{0,78}{2,25 \cdot 10^{-3}} \approx 347 \text{ m.s}^{-1}.$$

Compte-tenu de la précision de la mesure du délai, on garde deux chiffres significatifs et on conclut que dans les conditions de l'expérience, on a $c_s = 350 \text{ m.s}^{-1}$.

9

Distance d'un éclair

Enoncé
p. 44

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

On applique ici la formule :

$$\text{distance} = \text{vitesse} \times \text{temps}.$$

Le temps de propagation du son est ici simplement Δt , puisque la propagation de la lumière est considérée instantanée. Donc :

$$d = c_s \times \Delta t = 342 \times 4,6 = 1\,573 \text{ m} \approx 1,6 \text{ km.}$$

On ne garde ici que deux chiffres significatifs, puisque c'est la précision avec laquelle est donné Δt .

10

Ondes sonores

Enoncé
p. 44

Lycée Jean Sturm, Strasbourg

Les deux signaux correspondent, l'un à la transmission du choc par la fonte, l'autre à sa transmission par l'eau. Le temps t_1 que met le signal à se propager depuis la zone du choc jusqu'au capteur par l'eau s'écrit : $t_1 = \frac{d}{c_1}$.

De même, le temps t_2 de propagation du son par la fonte est donné par :

$$t_2 = \frac{d}{c_2}.$$

Donc :

$$\Delta t = t_1 - t_2 = d \left(\frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right) = d \times \frac{c_2 - c_1}{c_1 c_2}$$

On en déduit :

$$d = \Delta t \frac{c_1 c_2}{c_2 - c_1} = 0,46 \times \frac{5\,000 \times 1\,500}{5\,000 - 1\,500} = 9,9 \times 10^2 \text{ m.}$$

11 Distance de Vénus par écho radar

Enoncé
p. 45

Lycée Jules-Ferry, Paris

Durant le laps de temps séparant l'émission et la réception, le signal radio parcourt deux fois la distance D recherchée (puisque'il effectue un aller et retour). Ce parcours s'effectue dans le vide, donc on peut écrire :

$$2D = c \times t,$$

où $t = 5 \times 60 + 47,02 = 347,02$ s est l'intervalle de temps mesuré. On en déduit (en utilisant une valeur précise de la célérité de la lumière dans le vide, puisqu'on peut se permettre ici d'avoir 5 chiffres significatifs) :

$$D = \frac{299\,792 \times 347,02}{2} = 52,017 \times 10^6 \text{ km.}$$

12 Électrocardiogramme

Enoncé
p. 45

Lycée Voltaire, Paris

- 1 Le signal électrique se répète quasiment identique à lui-même à intervalles de temps fixes sur la durée de l'enregistrement. On peut donc le considérer comme périodique.
- 2 On lit sur l'enregistrement que l'intervalle de temps séparant deux pics identiques est égal à six fois 0,2 s, ce qui donne une période $T = 1,2$ s.
- 3 La fréquence associée est donnée par :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,2} = 0,83 \text{ Hz.}$$

Puisque la période est donnée en secondes, on obtient directement la fréquence en hertz.

- 4 Le nombre de battements par minute est égal au nombre de secondes qu'il y a dans une minute (60) divisé par la période T d'un battement. Le rythme cardiaque du patient est donc :

$$R = \frac{60}{1,2} = 50 \text{ battements.min}^{-1}.$$

13

Sonde échographique

Enoncé
p. 45

Lycée Stanislas, Paris

- 1 On observe un pic dans le signal reçu chaque fois que le faisceau d'ondes ultrasonores change de milieu (d'organe) à l'intérieur du corps, puisqu'il est alors partiellement réfléchi par la surface de l'organe. Pour associer chacun des transducteurs à son signal, il suffit de compter le nombre de frontières que traverse chacun des faisceaux, et de comparer au nombre de pics que comporte chaque signal (le premier pic ne compte pas puisqu'il correspond à l'émission de la salve). On obtient ainsi les correspondances suivantes :

- Transducteur A : signal 3
- Transducteur B : signal 1
- Transducteur C : signal 2

- 2 L'organe est traversé par le faisceau issu du transducteur A. Les deux pics de droite sur le signal 3, qui lui est associé, correspondent à la réflexion partielle du faisceau à l'entrée et à la sortie de l'organe. Le temps t qui sépare les deux pics correspond à l'aller retour du faisceau dans l'organe. Si on appelle d son diamètre, nous pouvons écrire :

$$t = \frac{2d}{c_s} \quad \text{soit : } d = \frac{tc_s}{2}.$$

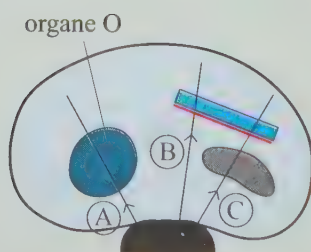
Application numérique :

Nous lisons sur le graphe du signal 3 que le temps séparant les deux pics est $t \approx 100 \mu\text{s}$.

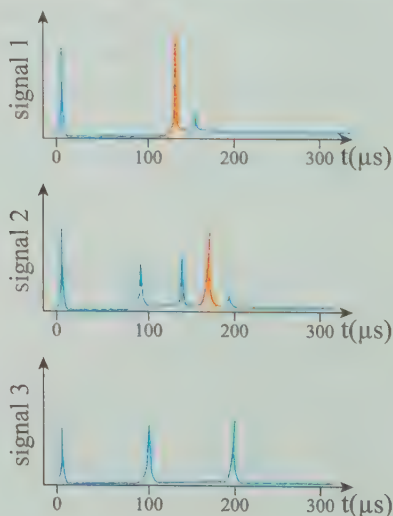
$$d = \frac{100 \times 10^{-6} \times 1\,650}{2} \approx 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}.$$

Nous gardons ici un seul chiffre significatif, compte-tenu de la basse précision de la lecture de l'intervalle de temps séparant les deux pics.

3



Sonde échographique



Lorsque le faisceau d'ultrasons est fortement réfléchi, on observe un pic important dans le signal du transducteur. Nous voyons que c'est le cas pour l'avant-dernier pic des signaux 1 et 2, qui correspondent à l'entrée du faisceau dans la structure rectiligne que l'on observe sur la figure de gauche. Cette structure est donc selon toute vraisemblance un os.

- 4 Soit T la période de l'onde, et t la durée de la salve. Nous avons la relation :

$$t = 30T,$$

et par ailleurs :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{30}{t},$$

où f est la fréquence recherchée.

Application numérique :

$$f = \frac{30}{10 \times 10^{-6}} = 3 \times 10^6 \text{ Hz} = 3,0 \text{ MHz}.$$

La fréquence de travail de la sonde considérée est de 3 mégahertz.

- 5 Le dernier pic des signaux 1 et 2 correspond à la réflexion du faisceau après qu'il se soit propagé dans un os. Puisqu'une grande partie du faisceau est réfléchi à l'entrée de l'os, seule une petite fraction est transmise dans l'os, qui ne pourra donner lieu qu'à des pics de faible intensité lors des réflexions ultérieures.

Réflexion et réfraction de la lumière

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Réflexion de la lumière
4. Réfraction de la lumière

Thèmes : la santé, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Kléber, Strasbourg

Un rayon émis dans l'air arrive sur un cube de silice avec un angle d'incidence i_1 , comme indiqué dans la figure ci-dessous.

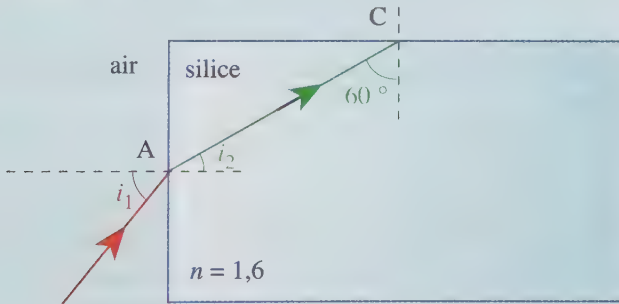


Figure 3.1 – Parcours d'un rayon lumineux dans un cube de silice

- 1 Calculer i_1 et i_2 .
- 2 Tracer la marche du rayon lumineux après le point C. Justifier.

Donnée : l'indice de réfraction de la silice est 1,6.

Voir corrigé page 58

Cet exercice aborde la notion de réfraction de la lumière, qui correspond à une déviation du rayon quand il arrive dans un milieu d'indice différent. Ce chapitre définit précisément les phénomènes de réflexion et de réfraction, ainsi que les lois qui s'y appliquent.

2 Définitions

Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite. On peut, en utilisant des diaphragmes suffisamment petits, obtenir des faisceaux de lumière quasiment assimilables à des segments de droite, qui matérialisent alors les rayons lumineux. Un faisceau lumineux un ensemble de rayons lumineux.

Définition 1

On appelle radiation monochromatique une radiation qui ne peut pas être décomposée par un dispositif dispersif (prisme ou réseau). Elle est caractérisée par une longueur d'onde λ .

Exemple : la lumière d'un laser est une radiation monochromatique.

Définition 2

Une radiation polychromatique est un ensemble de radiations monochromatiques de longueurs d'ondes différentes.

Exemple : la lumière blanche peut être décomposée en un grand nombre de radiations de longueurs d'onde différentes (correspondant à toutes les couleurs de l'arc en ciel). C'est une radiation polychromatique.

Définition 3

On appelle indice de réfraction d'un milieu transparent le nombre sans dimension n défini par :

$$n = \frac{c}{v}$$

Dans cette expression, v est la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu et c la vitesse de la lumière dans le vide.

Dans le vide $v = c$, donc $n = 1$. Dans les milieux transparents, la lumière a une vitesse inférieure à celle qu'elle a dans le vide : $v < c$, donc $n > 1$.

À RETENIR

Dans les milieux transparents : $n > 1$.

Dans le vide : $c = 1$.

Définition 4

On appelle dioptré toute surface de séparation entre deux milieux transparents d'indices différents.

Lorsqu'un rayon lumineux arrive à un dioptré, une partie de la lumière est réfléchi (rayon réfléchi) tant que l'autre pénètre dans l'autre milieu en étant déviée au passage du dioptré (rayon réfracté).

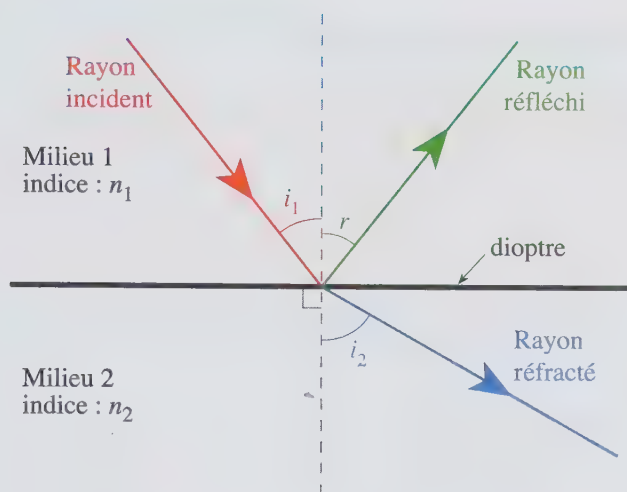


Figure 3.2 – Notations relatives aux différents rayons. On a ici $n_2 < n_1$.

Définition 5

On appelle normale au dioptré la droite perpendiculaire au dioptré.

Définition 6

On appelle plan d'incidence le plan perpendiculaire au dioptré qui contient le rayon d'incidence.

Le plan d'incidence contient le rayon incidence et la normale au dioptré.

3 Réflexion de la lumière

Un rayon lumineux se réfléchit sur un miroir ou sur un dioptré. On parle de *réflexion* du rayon lumineux.

Lorsque la réflexion a lieu sur un dioptré, elle peut être partielle, et une partie de rayon peut également être réfractée : elle passe au travers du dioptré et change de direction (voir paragraphe 4).

➔ À RETENIR : lois de Snell-Descartes relatives à la réflexion

- 1) Le rayon réfléchi et le rayon incident sont dans le plan d'incidence.
- 2) L'angle d'incidence i_1 est égal à l'angle de réflexion r .

4 Réfraction de la lumière

À RETENIR : lois de Snell-Descartes relatives à la réfraction

- 1) Le rayon réfracté et le rayon incident sont dans le plan d'incidence.
- 2) L'angle d'incidence i_1 et l'angle du rayon réfracté i_2 vérifient la relation :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 .$$

Il se peut dans certains cas qu'il ne soit pas possible de vérifier la relation précédente, parce que cela conduirait à $\sin i_2 > 1$, ce qui est mathématiquement impossible.

Cela a lieu lorsqu'un rayon lumineux arrive avec un angle d'incidence assez élevé sur un milieu d'indice n_2 inférieur à n_1 . Il y a alors un angle d'incidence limite i_l au-delà duquel le rayon réfracté ne peut plus exister. On a dans ce cas une *réflexion totale*.

À RETENIR : réflexion totale

L'angle limite i_l pour l'existence d'un rayon réfracté est donné par :

$$\sin i_l = \frac{n_2}{n_1} .$$

Si l'angle d'incidence est supérieur à i_l , il y a réflexion totale.

Définition 7

On dit qu'un milieu est *dispersif* lorsque son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde de la lumière émise.

Exemple : le verre est dispersif. C'est pourquoi un prisme de verre disperse la lumière blanche suivant ses différentes longueurs d'onde.

Solution de l'exercice type

Lycée Kléber, Strasbourg

1. Pour déterminer i_2 , on écrit que la somme des angles du triangle ABC de la figure ci-dessous est égale à 180° . Comme ce triangle est rectangle en B , on trouve que $i_2 = 30^\circ$. En appliquant la relation de Snell-Descartes relative à la réfraction au point A , on peut écrire :

$$n_{\text{air}} \sin i_1 = n_{\text{silice}} \sin i_2 , \quad \sin i_1 = 1,6 \times \sin 30^\circ$$

Donc $i_1 = 53^\circ$.

Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Kléber, Strasbourg

- 2 Il faut à présent étudier ce qui se passe au point C. Y a-t-il réflexion totale ou bien y a-t-il émergence d'un rayon réfracté ? Si la relation de Snell-Descartes relative à la réfraction était vraie, on aurait la relation :

$$n_{\text{silice}} \sin 60^\circ = n_{\text{air}} \sin i_3,$$

où i_3 serait l'angle d'émergence du rayon réfracté. Cependant, on voit que le membre de droite de cette égalité ne peut en aucun cas dépasser 1, alors que le membre de gauche, donné par la calculatrice, vaut 1,38. Il est donc impossible qu'il y ait un rayon réfracté. Il y a *réflexion totale*.

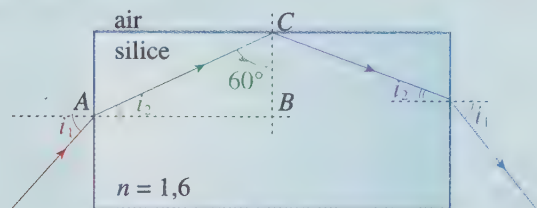


Figure 3.3 – Marche du rayon pénétrant dans le bloc de silice.

La marche du rayon après la réflexion en C est symétrique de la marche avant C. En effet, par des arguments analogues à ceux invoqués au début de cette solution, il est facile de montrer que l'angle d'incidence sur la face arrière du bloc est égal à i_2 .

Il est également facile de vérifier que l'angle d'émergence du rayon réfracté dans l'air est i_1 , parce qu'on écrit la même relation de Snell-Descartes relative à la réfraction.

Remarque : au point où le rayon émerge dans l'air, il y a aussi une réflexion partielle, et le rayon correspondant n'a pas été tracé sur la figure. On se convaincra facilement que la marche du rayon partiellement réfléchi ressemble en tout point à la marche déjà étudiée, avec en particulier une réflexion totale sur la face inférieure du bloc de silice, et une émergence sur la face gauche avec un angle i_1 , accompagné d'une réflexion partielle, etc.

ATTENTION

Avant de se lancer dans des calculs trigonométriques avec la calculatrice, il est prudent de vérifier que celle-ci est bien configurée en degrés et non en radians. Pour s'en assurer, un moyen est de vérifier que « $\sin 90^\circ$ » donne bien 1 comme résultat.

Voir énoncé page 55

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 72

1 Sur un miroir, les rayons lumineux se :

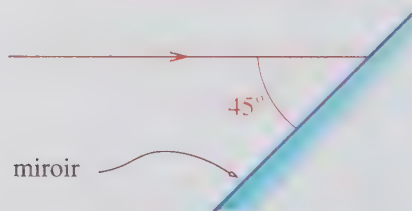
☐ a réfractent☐ b réfléchissent

2 Le rayon représenté sur la figure ci-dessous va-t-il se réfléchir totalement ?

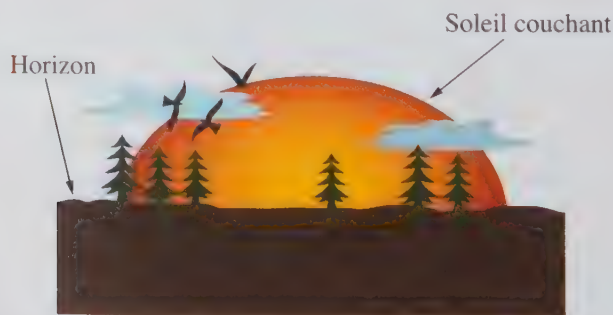
☐ a oui☐ b non

3 Vrai ou faux ?

- (a) Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.
- (b) Un dioptre est une surface de séparation entre deux milieux d'indices égaux.
- (c) Un rayon est toujours renvoyé dans la direction d'où il vient par un miroir.
- (d) Le rayon réfléchi par le miroir de la figure ci-dessous est perpendiculaire au rayon incident :



4 Le Soleil couchant apparaît généralement aplati, comme représenté ci-dessous. Quel mécanisme physique en est à l'origine ?

☐ a La réflexion☐ b La réfraction

2 Compléter les phrases



5 min

 ➔ Corrigé
p. 72

Lycée Jacques Decour, Paris

- 1 Une lumière est un ensemble de plusieurs radiations.
- 2 Une lumière ne peut pas être décomposée par un prisme.
- 3 À chaque radiation, on associe une grandeur appelée
- 4 Les radiations infrarouges visibles par l'œil humain.
- 5 Le changement de direction que subit la lumière lorsqu'elle change de milieu de propagation est appelé
- 6 Pour une radiation donnée, un milieu transparent est caractérisé par un nombre appelé
- 7 L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon incident et la au dioptre.

3 Fibre optique



10 min

 ➔ Corrigé
p. 72

Lycée Blaise Pascal, Orsay

Un signal lumineux est transmis par une fibre optique. Il met 0,12 ms pour parcourir 24 km.

- 1 Quelle est la vitesse de propagation du signal dans le verre constituant la fibre optique ?
- 2 Quel aurait été le temps mis par ce même signal pour parcourir la même distance dans le vide ?
- 3 Quelle est la valeur de l'indice de réfraction du verre constituant la fibre ?

Donnée : célérité de la lumière : $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.

4 Réfraction



2 min

 ➔ Corrigé
p. 73

Lycée Louis Le Grand, Paris

La situation représentée sur cette figure est-elle possible ?

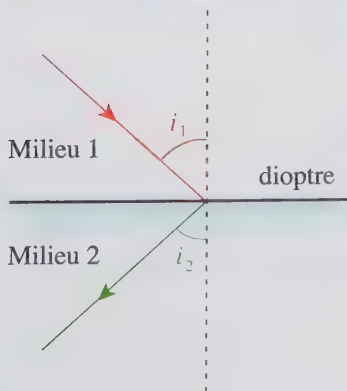


Figure 3.4 – Le rayon transmis est du même côté de la normale au dioptre que le rayon incident.

5 Dioptre air-eau

★★

5 min

Corrigé
p. 73

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

Un rayon lumineux se propage dans le verre d'indice $n_1 = 1.5$ et passe dans l'eau d'indice $n_2 = 1,33$.

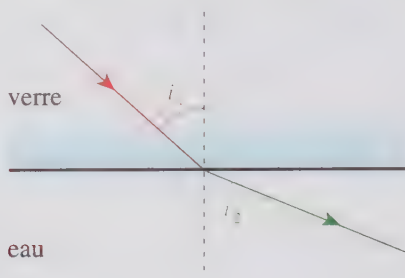


Figure 3.5 – Le rayon est réfracté au franchissement du dioptre verre/eau.

- 1 Pour quelle valeur i_1 de l'angle d'incidence l'angle de réfraction i_2 vaut-il 60 degrés ?
- 2 On augmente i_1 petit à petit. À partir de quelle valeur de i_1 y a-t-il réflexion totale ?

6 Marche d'un rayon

★★

10 min

Corrigé
p. 74

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

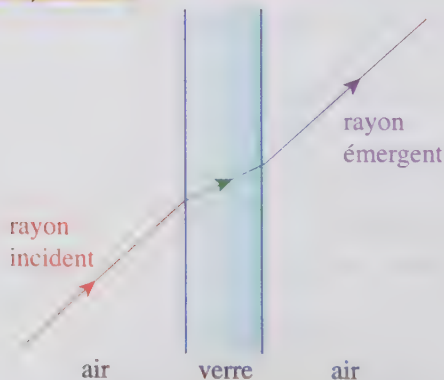


Figure 3.6 – Rayon lumineux incident sur une lame à faces parallèles.

Un rayon lumineux arrive sur une lame de verre à faces parallèles, d'indice n , sous une incidence quelconque.

Montrer que le rayon émergent est parallèle au rayon incident.

7 Réfraction

★ ★

10 min

 ➔ Corrigé
p. 75

Lycée Saint-Martin, Pontoise



Au fond d'un récipient, on place une pièce de monnaie. L'observateur se place juste de manière à ne plus la voir quand le récipient est vide. On remplit d'eau le récipient à ras-bord. L'observateur voit-il la pièce ?

8 Marche d'un rayon

★ ★

10 min

 ➔ Corrigé
p. 75

Lycée Henri IV, Paris

Tracer la marche du rayon lumineux ci-dessous jusqu'à ce qu'il émerge du prisme d'indice 1,58 lorsqu'il est plongé :

- 1 dans l'air (indice 1,00) ; 2 dans l'eau (indice 1,33).

On tiendra compte d'éventuels rayons réfléchis.

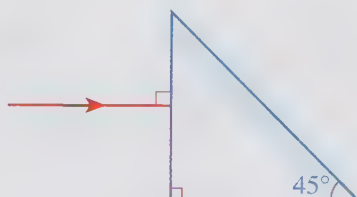


Figure 3.7 – Le rayon arrive avec une incidence normale sur la face gauche du prisme.

9 Marche d'un rayon

★ ★

5 min

 ➔ Corrigé
p. 76

Lycée Gabriel Fauré, Paris

Tracer la marche du rayon lumineux ci-dessous jusqu'à ce qu'il émerge du prisme. Calculer la vitesse de propagation de la lumière dans le prisme. Le milieu extérieur est l'air.

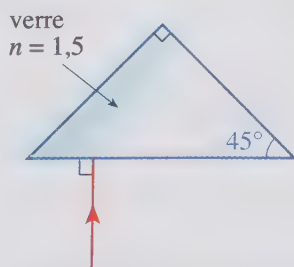


Figure 3.8 – Le rayon arrive perpendiculairement à la face inférieure du prisme.

10 Phénomène de mirage

★★

10 min

Corrigé
p. 77

Lycée Jean Prévost, Montevilliers

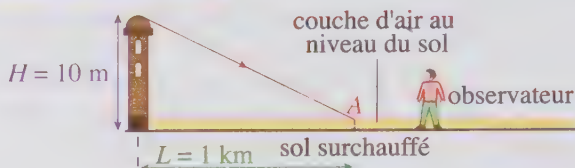


Figure 3.9 – Conditions d'observation du phénomène de mirage.

On regarde dans le désert une tour de 10 m de haut à 1 km de distance. La couche d'air surchauffé au niveau du sol, d'épaisseur négligeable, a un indice de réfraction 1,003 fois plus élevé que le reste de l'atmosphère. Montrer que le rayon issu du sommet de la tour et arrivant en A subit une réflexion totale. Indiquer ce que voit l'observateur.

11 Marche d'un rayon

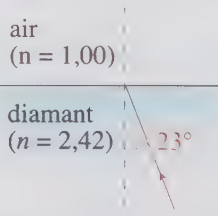
★★

5 min

Corrigé
p. 78

Lycée Janson de Sailly, Paris

Tracer la marche des rayons transmis et réfléchi.

Figure 3.10 – Le rayon arrive sur le dioptre diamant/air avec une incidence de 23° .

12 Cuve à réfraction

★★

10 min

Corrigé
p. 78

Lycée Bergson, Paris

On remplit une cuve à réfraction d'un liquide transparent d'indice de réfraction n . Un faisceau lumineux faisant un angle d'incidence $i = 60^\circ$ avec la face est réfracté dans le liquide. L'angle de réfraction mesuré est $i' = 42^\circ$.

- 1 Faire un schéma clair du dispositif expérimental, et faire apparaître les angles i et i' .
- 2 Calculer l'indice de réfraction du liquide.

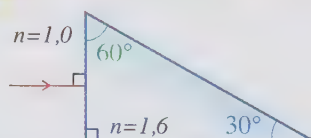
13 Marche d'un rayon

★★

15 min

Corrigé
p. 79

Lycée Parc-Impérial, Nice



Un rayon lumineux se propageant dans l'air ($n = 1,0$) arrive sous incidence normale sur la face d'un prisme de silice ($n = 1,6$), comme représenté sur la figure ci-dessus.

- 1 Expliquer pourquoi le rayon pénètre dans le prisme sans être dévié.
- 2 Montrer que ce rayon subit une réflexion totale sur la face oblique.
- 3 Tracer la marche du rayon jusqu'à ce qu'il émerge du prisme.

14 Aquarium

★★★

10 min

Corrigé
p. 80

Lycée du Parc des Loges, Évreux

Une source lumineuse étanche se trouve au fond d'un aquarium. Elle émet un pinceau lumineux en direction de la surface, avec un angle d'incidence $i = 30^\circ$. La vitesse de la lumière dans l'eau est $v = 2,25 \times 10^8 \text{ km.s}^{-1}$.

- 1 Quel est l'indice de réfraction de l'eau ?
- 2 Représenter la situation sur un schéma. Quel est l'angle de réfraction du pinceau ? Tracer la marche du rayon incident et réfracté.

Données :

- $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
- $n_{\text{air}} = 1,00$.

15 Demi-cylindre

★★★

30 min

Corrigé
p. 81

Lycée Arago, Paris

On dispose d'un demi-cylindre d'un matériau transparent. Ce matériau est caractérisé par la courbe représentée à la figure page suivante.

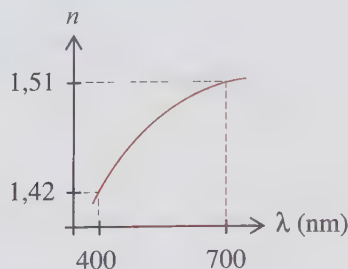


Figure 3.11 – Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

- 1 Ce matériau est-il dispersif ? Justifier.
- 2 Donner une estimation de la vitesse de propagation de la lumière violette ($\lambda = 400 \text{ nm}$) dans ce milieu.
- 3 Donner une estimation de la vitesse de propagation de la lumière rouge ($\lambda = 700 \text{ nm}$) dans ce milieu.
- 4 On envoie un mince faisceau de lumière blanche avec une incidence de 30° sur la face plane de ce demi-cylindre, en son centre, de manière à en former un spectre.
 - (a) De quel côté se trouve la lumière rouge ?
 - (b) Quel est l'angle d'ouverture α du spectre obtenu ?

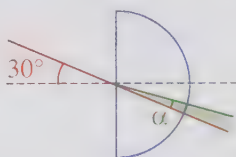


Figure 3.12 – Angle d'ouverture du spectre.

15 Projecteur dans un bassin



30 min

Corrigé
p. 83

Lycée Pasteur, Neuilly

Sur le fond horizontal d'un bassin, est mis en place un projecteur lumineux P . On suppose cette source lumineuse ponctuelle.

Ce projecteur envoie un faisceau lumineux vers la surface de l'eau située à $h = 0,80 \text{ m}$. Le faisceau a la forme d'un cône de révolution dont l'angle au sommet a pour valeur 120° . L'axe de symétrie du cône est vertical. L'indice de réfraction de l'eau est égal à $n = 1,33$.

- 1 Pour les rayons lumineux issus du projecteur dont les angles d'incidence valent 0 , 20 et 40 degrés, calculer les angles de réfraction dans l'air. Tracer ces rayons.
- 2 Calculer l'angle de réfraction limite pour ces deux milieux eau-air.
- 3 Montrer que le fond du bassin est fortement éclairé sur une surface ayant la forme d'un anneau. Tracer les rayons qui délimitent cet anneau. Calculer son rayon extérieur.

17

Profondeur apparente d'une piscine

★★★

15 min

 Corrigé
p. 85

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

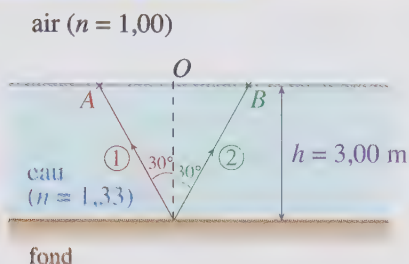


Figure 3.13 – Les deux rayons 1 et 2 sont issus d'un même point du fond de la piscine.

On se propose d'expliquer pourquoi une piscine remplie d'eau paraît moins profonde qu'à vide.

- 1 Tracer la marche 1' et 2' dans l'air des rayons réfractés issus des rayons 1 et 2.
- 2 Quelle est la distance entre les points A et B ?
- 3 À quelle profondeur sous la surface les rayons 1' et 2' s'intersectent-ils ?

18

Fibre optique

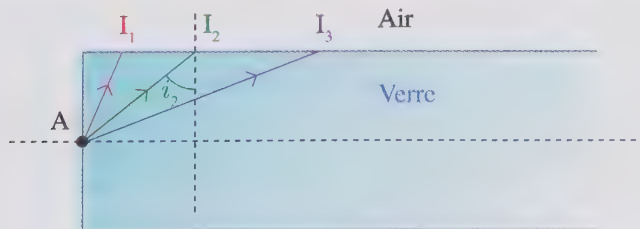
★★★

20 min

 Corrigé
p. 85

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

Un point lumineux A se trouve au centre de l'extrémité d'une fibre optique en verre. On considère les rayons lumineux issus de A et arrivant en I_1 , I_2 et I_3 sur le dioptre verre/air comme indiqué sur le schéma ci-après.



Au point I_2 , l'angle de réfraction vaut 90° et l'angle d'incidence est noté i_2 .

- 1 En exploitant le schéma, justifier que le verre utilisé est un milieu homogène et transparent.
- 2 Quelle est la nature des ondes lumineuses ? Donner un autre exemple de ce type d'onde.
- 3 À quelles conditions la réflexion totale peut-elle se produire à la surface de séparation entre un premier milieu et un second milieu ?

- 4 Quelle condition est forcément respectée dans le cas de la fibre optique étudiée ?
- 5 Comparer les angles d'incidence i_1 et i_3 aux points I_1 et I_3 à la valeur de l'angle i_2 .
- 6 L'angle i_2 est en fait l'angle limite i_L ; quelle information de l'énoncé permet de justifier cette affirmation ? Justifier.
- 7 Y aura-t-il réflexion totale au point I_1 ? au point I_3 ? Justifier.
- 8 Tracer sur le schéma l'allure du chemin suivi par la lumière lorsqu'elle arrive aux points I_1 , I_2 et I_3 .

19 Spectre de la lumière blanche

★★★

15 min

Corrigé
p. 87

Lycée Saint-Exupéry, Lyon

On fait arriver un pinceau de lumière blanche sur la face plate d'un demi-cylindre de verre, avec l'incidence i non nulle. De l'autre côté du demi-cylindre, on dispose un écran blanc, comme représenté sur la figure ci-après :

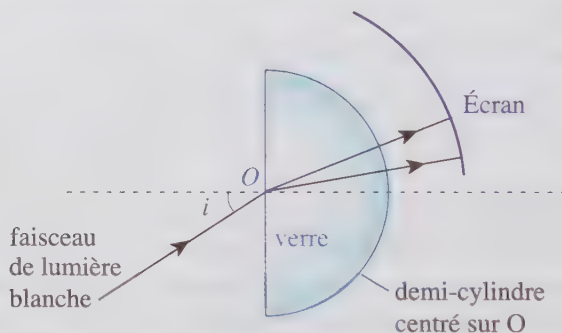


Figure 3.14 – Le faisceau arrive sur le demi-cylindre avec une incidence non nulle.

Sachant que l'indice de réfraction du verre varie légèrement du rouge au violet, selon une loi du type $n = a + bv$, où v est la fréquence de la radiation électromagnétique considérée et où a et b sont des constantes positives, indiquer ce que l'on voit sur l'écran. De quel côté est le rouge ?

20 Étude d'un prisme simplifié

★★★

20 min

Corrigé
p. 87

Lycée Montaigne, Bordeaux

Un faisceau de lumière blanche arrive sur un prisme comme indiqué sur la figure page suivante. Ce prisme est fait dans un matériau transparent M, tel que son indice de réfraction dépende légèrement de la longueur d'onde :

$$n(\lambda) = 1,200 + \frac{70}{\lambda}$$

où λ est la longueur d'onde, exprimée en nanomètres.

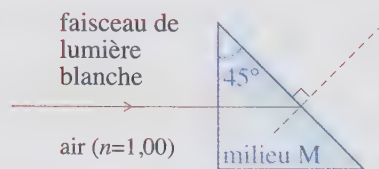


Figure 3.15 – Le faisceau arrive sur le prisme sous incidence normale.

- 1 Que contient la lumière blanche ?
- 2 On considère, parmi toutes les ondes que véhicule la lumière blanche, une onde de longueur d'onde $\lambda_a = 650 \text{ nm}$. Quelle est sa couleur ? Quel est l'indice n_a du matériau pour cette onde ? Avec quel angle émerge-t-elle du prisme ? La tracer.
- 3 On considère à présent, parmi toutes les ondes que véhicule la lumière blanche, une onde de longueur d'onde $\lambda_b = 400 \text{ nm}$. Quelle est sa couleur ? Quel est l'indice n_b du matériau pour cette onde ? Avec quel angle émerge-t-elle du prisme ? La tracer.
- 4 Que voit-on si on projette le faisceau émergent sur un écran ?

21 Réfraction atmosphérique



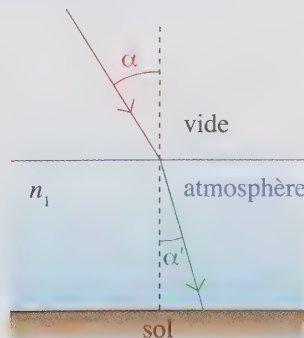
20 min

Corrigé
p. 88

Lycée Notre-Dame du Grandchamp, Versailles

On observe une étoile dont la direction fait avec la verticale du lieu un angle $\alpha = 70^\circ$. On considère un rayon lumineux issu de cette étoile.

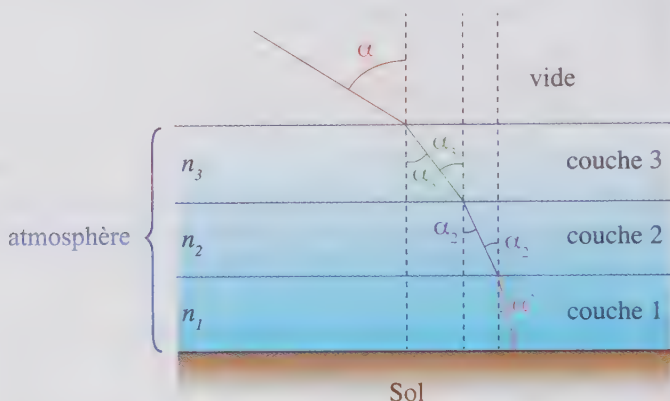
- 1 On considère dans un premier temps que l'atmosphère est une couche d'air homogène d'indice $n_1 = 1,0003$.



- (a) Quel est l'indice de réfraction du vide ?
- (b) On appelle α' l'angle d'émergence du rayon dans l'atmosphère. Donner la relation entre α' , α et n_1 .

- (c) En déduire la valeur numérique de l'angle d'émergence du rayon dans l'atmosphère.
- (d) Quelle est la différence entre cet angle et l'angle d'incidence ?
- (e) L'étoile observée paraît-elle plus haute ou plus basse qu'elle ne l'est en réalité ?

2 On considère à présent que l'atmosphère est composée de trois couches d'air de densité différente, et d'indices respectifs n_1 , n_2 et n_3 .



Montrer que la relation précédente entre α' , α et n_1 est toujours valable.

22 Fibroscopie

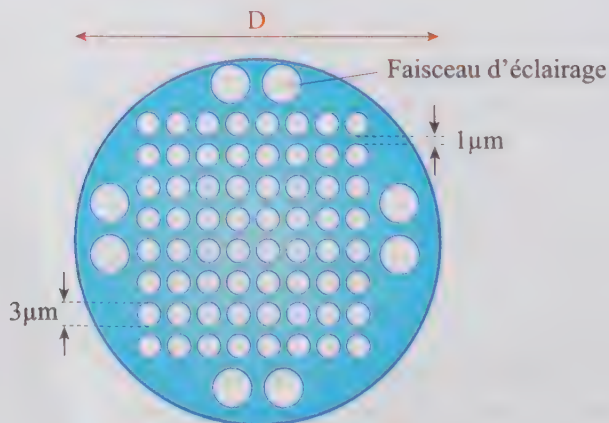
Lycée Saint-Louis, Paris



40 min

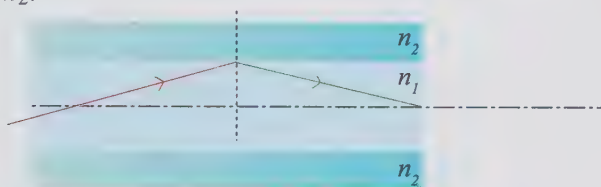
Corrigé
p. 89

On considère un fibroscope dont on représente une section sur la figure suivante.



Cette section comporte deux parties :

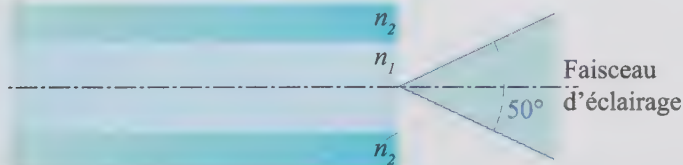
- Un faisceau d'illumination, qui consiste en huit fibres optiques à saut d'indice. Le cœur de chacune de ces fibres est constitué d'un matériau transparent d'indice n_1 . Autour de ce cœur se trouve autre matériau transparent d'indice n_2 .



fibres optiques

- Un faisceau d'imagerie, constitué de fibres optiques de diamètre $d = 3,0 \mu\text{m}$, séparées d'une distance de $1,0 \mu\text{m}$, disposées en un réseau carré. La gaine à l'intérieur de laquelle sont disposées les fibres optiques a un diamètre de 18 % supérieur à la diagonale du carré du faisceau d'imagerie.

- Quelle est la fonction du faisceau d'éclairage ?
 - Certains des rayons lumineux se propageant dans le cœur des fibres du faisceau d'éclairage subissent une réflexion totale sur le dioptré cœur-gaine. Démontrer que $n_1 > n_2$.
 - Sachant que $n_1 = 1,50$ et que le faisceau d'éclairage, dans l'air en sortie du fibroscope, a un angle d'ouverture égal à 50° , déterminer l'indice de réfraction n_2 .



- Quel est l'angle d'ouverture du faisceau d'éclairage lorsque l'extrémité du fibroscope se trouve dans de l'eau ?

- Quelle est la fonction du faisceau d'imagerie ?
 - Pourquoi le faisceau d'imagerie comporte-t-il un grand nombre de fibres optiques ?
 - L'image que donne ce fibroscope est une image de 200×200 pixels. En déduire le diamètre de la gaine du fibroscope.

Données : • Indice de réfraction de l'eau : $n_e = 1,33$.

23

Angle de Brewster

★★★

20 min

Corrigé
p. 92

Lycée Montaigne, Bordeaux

Un rayon lumineux se propage dans l'air et arrive sur un bloc de verre d'indice de réfraction $n = 1,5$. Calculer l'angle d'incidence pour que le rayon réfléchi soit perpendiculaire au rayon réfracté (cet angle est appelé *angle de Brewster*).

1 QCM Testez vos connaissances

Enoncé
p. 60

- 1 Ils se réfléchissent (c'est toujours le cas sur un miroir).
- 2 Le rayon va se réfléchir (on est dans un cas d'incidence rasante sur un milieu moins réfringent).
- 3 (a) *Vrai*.
(b) *Faux*. Les indices des milieux doivent être différents.
(c) *Faux*. Il est renvoyé dans la direction symétrique par rapport à la normale au plan d'incidence.
(d) *Vrai*. L'angle α que fait le rayon réfléchi avec l'incident est donné par $\alpha = 180 - 45 \times 2 = 90^\circ$.
- 4 La réfraction est à l'origine de ce phénomène. Les rayons sont d'autant plus déviés (par réfraction dans l'atmosphère terrestre) qu'ils sont proches de l'horizon. Cela donne son aspect aplati au Soleil couchant.

2 Compléter les phrases

Enoncé
p. 61

Lycée Jacques Decour, Paris

- 1 Une lumière *polychromatique* est un ensemble de plusieurs radiations.
- 2 Une lumière *monochromatique* ne peut pas être décomposée par un prisme.
- 3 À chaque radiation, on associe une grandeur appelée *longueur d'onde*.
- 4 Les radiations infrarouges *ne sont pas* visibles par l'œil humain.
- 5 Le changement de direction que subit la lumière lorsqu'elle change de milieu de propagation est appelé *réfraction*.
- 6 Pour une radiation donnée, un milieu transparent est caractérisé par un nombre appelé *indice de réfraction*.
- 7 L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon incident et la *normale* au dioptre.

3 Fibre optique

Enoncé
p. 61

Lycée Blaise Pascal, Orsay

- 1 La vitesse de propagation v du signal dans le verre constituant la fibre optique est donnée par :

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

où $d = 24$ km est la distance parcourue et $t = 0,12$ ms le temps mis pour la parcourir. On obtient :

$$v = \frac{24 \times 10^3}{0,12 \times 10^{-3}} = 2,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

Il faut prendre soin de convertir la distance et le temps dans les unités du Système International.

- 2 Le temps t' mis par ce même signal pour parcourir la distance d dans le vide est

$$t' = \frac{d}{c} = \frac{24 \times 10^3}{3,0 \times 10^8} = 8,0 \times 10^{-5} \text{ s} = 0,080 \text{ ms.}$$

- 3 L'indice de réfraction du verre constituant la fibre est donné par :

$$n = \frac{c}{v} = 1,5$$

On note que ce calcul s'applique seulement aux rayons transmis le long de l'axe de la fibre, qui parcourent une longueur égale à la longueur de la fibre. Les rayons faisant un angle non nul par rapport à l'axe de la fibre peuvent décrire des trajectoires en « zigzag » ou sinusoïdale (selon le type de fibre), plus longues que la fibre elle-même. Nous ne pouvons connaître que l'indice de réfraction du verre proche de l'axe de la fibre.



Réfraction

➔ Enoncé
p. 61

Lycée Louis Le Grand, Paris

Cette situation est bien entendu *impossible*, ceci quels que soient les indices de réfraction des milieux respectifs, car l'angle de réfraction doit être de l'autre côté de la normale au dioptre par rapport au rayon incident.



Dioptre air-eau

➔ Enoncé
p. 62

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

- 1 Pour cet exercice, il suffit d'appliquer la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

Cela donne :

$$1,5 \sin i_1 = 1,33 \sin 60^\circ.$$

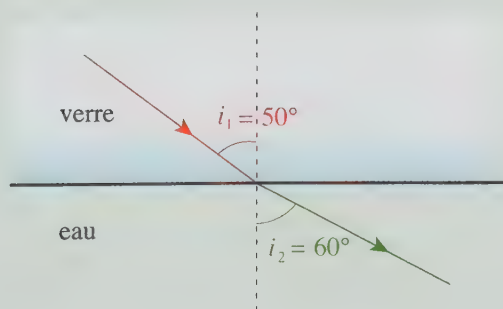


Figure 3.16 – Marche du rayon réfracté au passage du dioptre verre/eau.

L'application numérique donne :

$$i_1 = 50^\circ.$$

- 2 Il y a réflexion totale quand $i_2 = 90^\circ$ donc $\sin i_2 = 1$, par conséquent :

$$1,5 \sin i_1 = 1,33 \quad \text{soit :} \quad \sin i_1 = 0,89.$$

Application numérique :

$$i_1 = 62^\circ.$$



Marche d'un rayon

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

Enoncé
p. 62

On nomme les différents angles conformément à la figure ci-dessous :

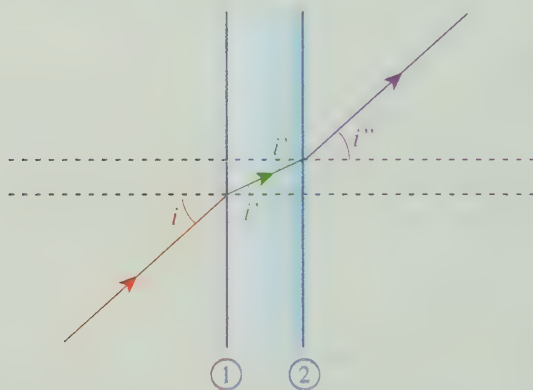


Figure 3.17 – Notation des angles.

On constate que l'angle i' , qui est l'angle du rayon réfracté au dioptré 1, est aussi l'angle du rayon incident au dioptré 2.

Écrivons la loi de Snell-Descartes au dioptré 1 :

$$\sin i = n \sin i'.$$

Écrivons-la à présent au dioptré 2 :

$$n \sin i' = \sin i''.$$

Des deux égalités précédentes on déduit :

$$\sin i = \sin i''.$$

Puisque les angles i et i'' sont tous deux aigus et positifs, on conclut que :

$$i = i'',$$

donc le rayon émergent est parallèle au rayon incident.

7 Réfraction

Lycée Saint-Martin, Pontoise

Enoncé
p. 63



Oui, l'observateur voit la pièce. En effet, un rayon lumineux, au franchissement du dioptre eau/air, s'écarte de l'axe normal au dioptre, puisque l'indice de réfraction de l'air est plus petit que celui de l'eau. Cela permet au rayon de « contourner » le bord du récipient, et donc à l'observateur de voir la pièce.

8 Marche d'un rayon

Lycée Henri IV, Paris

Enoncé
p. 63

- 1 Le rayon frappe perpendiculairement la face gauche du prisme donc il ne subit pas de déviation. Il arrive sur la face oblique et là se pose la question de savoir s'il est totalement réfléchi ou s'il est réfracté. Puisque dans le premier cas le milieu extérieur est l'air, d'indice 1, l'angle limite pour la réfraction vaut i_l tel que :

$$n_{\text{air}} \sin 90^\circ = n_{\text{prisme}} \sin i_l$$

donc :

$$\sin i_l = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{prisme}}} = \frac{1,00}{1,58}$$

D'où :

$$i_l = 39^\circ$$

en utilisant la touche $\sin^{-1}$ ou $\arcsin$ de la calculatrice.

L'angle d'incidence du rayon (45°) étant supérieur à cet angle limite, il y a réflexion totale et le rayon est réfléchi vers la face inférieure du prisme, qu'il frappe perpendiculairement, qu'il traverse donc sans être dévié.

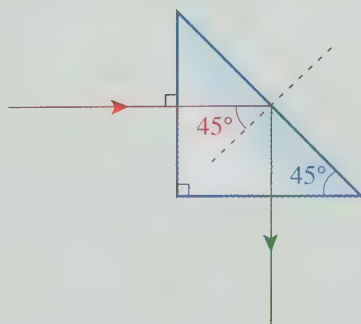


Figure 3.18 – Le rayon est totalement réfléchi sur la face oblique du prisme.

- 2 Dans ce deuxième cas, la première partie de la marche est la même et le rayon arrive sur la face oblique du prisme avec une incidence de 45° . Cependant l'angle limite a changé de valeur puisque l'indice du milieu extérieur a varié, et on a ici :

$$\sin i_l = \frac{n_{\text{eau}}}{n_{\text{prisme}}} = \frac{1,33}{1,58}$$

soit :

$$i_l = 57^\circ.$$

Cette fois, l'angle d'incidence est inférieur à l'angle limite, et il y a émergence d'un rayon réfracté, avec un angle i . En écrivant la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, on a :

$$n_{\text{prisme}} \sin 45^\circ = n_{\text{eau}} \sin i$$

qui donne tous calculs faits :

$$i = 57^\circ$$

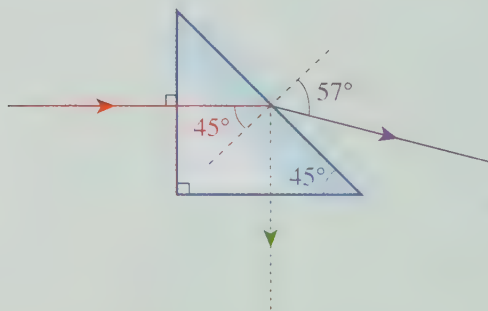


Figure 3.19 – Le rayon incident sur la face oblique du prisme donne cette fois lieu à un rayon réfléchi et un rayon transmis.

Remarque : il y a aussi une réflexion partielle qui donne lieu à une marche identique à celle déterminée à la première question.



Marche d'un rayon

Lycée Gabriel Fauré, Paris

Enoncé
p. 63

Lorsqu'il entre dans le prisme, le rayon lumineux ne subit pas de déviation puisqu'il a un angle d'incidence nul. Il frappe la face oblique de gauche avec une incidence de 45° . L'angle limite de réfraction est donné par la formule :

$$\sin i_l = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}}}.$$

Le calcul donne : $i_l = 42^\circ$. Cet angle limite est inférieur à l'angle d'incidence, donc le rayon subit une réflexion totale.

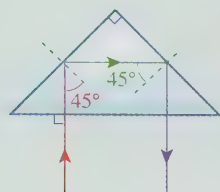


Figure 3.20 – Le rayon est totalement réfléchi sur chacune des faces obliques du prisme.

Il y a donc un rayon réfléchi qui part horizontalement vers la droite. Par un raisonnement symétrique du précédent, on voit que ce rayon va être lui aussi totalement réfléchi et renvoyé avec un angle d'incidence nul vers la face inférieure du prisme, et donc ce rayon émerge du prisme sans être dévié.

La vitesse de la lumière dans le prisme est donnée par :

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3,00 \times 10^8}{1,5} = 2,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

10 Phénomène de mirage

➔ **Énoncé**
p. 64

Lycée Jean Prévost, Montevilliers

Pour montrer qu'il y a réflexion totale, il faut calculer l'angle limite. Celui-ci est tel que :

$$1,00 \times \sin 90 = 1,003 \times \sin i_l,$$

soit :

$$i_l = 85,57^\circ.$$

Or ici, l'angle d'incidence α du rayon issu de la tour est 90° moins l'angle apparent α sous lequel est vue la tour, qui est donné par :

$$\tan \alpha = \frac{H}{L},$$

d'où l'on déduit que :

$$\alpha = 0,57^\circ,$$

donc l'angle d'incidence vaut $89,43^\circ$. Il est supérieur à i_l , donc il y a réflexion totale.

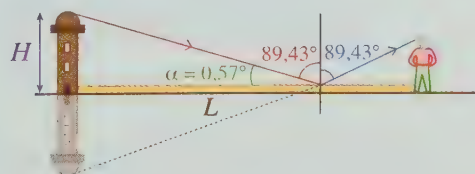


Figure 3.21 – Marche d'un rayon issu du sommet de la tour.

Ainsi, la couche d'air surchauffée au niveau du sol se comporte comme un miroir, et l'observateur voit la tour se refléter sur le sol, comme sur un lac. Il a l'impression qu'il y a une surface d'eau entre lui et la tour. C'est le phénomène de mirage.

11 Marche d'un rayon

➔ **Énoncé**
p. 64

Lycée Janson de Sailly, Paris

Pour connaître l'angle d'émergence i' du rayon transmis, on utilise la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction :

$$1,00 \times \sin(i') = 2,42 \times \sin 23^\circ ,$$

ce qui donne :

$$i' = 71^\circ .$$

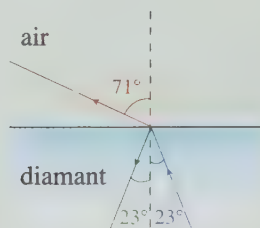


Figure 3.22 – Marche des rayons réfléchi et transmis.

Quant au rayon réfléchi, il fait un angle de 23° avec la normale au dioptre, d'après la loi de Snell-Descartes relative à la réflexion.

12 Cuve à réfraction

➔ **Énoncé**
p. 64

Lycée Bergson, Paris

- 1 Le dispositif expérimental a l'allure suivante :

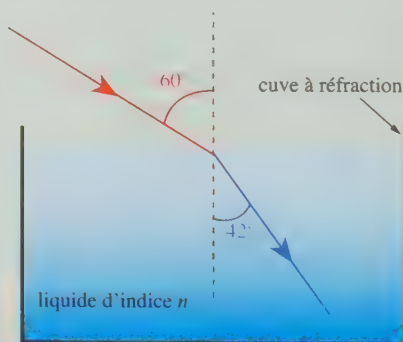


Figure 3.23 – Marche du rayon incident dans la cuve à réfraction.

- 2 On écrit la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction du faisceau lorsqu'il franchit le dioptre air/liquide. Nous avons :

$$n_{\text{air}} \sin 60^\circ = n \sin 42^\circ ,$$

d'où l'on déduit :

$$n = n_{\text{air}} \frac{\sin 60^\circ}{\sin 42^\circ} = 1,29 .$$

13 Marche d'un rayon

Enoncé
p. 64

Lycée Parc-Impérial, Nice

- 1 Puisque le rayon arrive sous incidence normale, alors l'angle d'incidence vaut $i = 0^\circ$. D'après la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, on a :

$$1,0 \times \sin i = 1,6 \times \sin i',$$

où i' est l'angle d'émergence. Donc $\sin i' = 0$ d'où $i' = 0^\circ$, ce qui signifie que le rayon n'est pas dévié au franchissement du premier dioptré qu'il rencontre.

- 2 L'angle d'incidence du rayon sur la face oblique s'obtient aisément par des considérations simples sur les angles supplémentaires et sur la somme des angles d'un triangle. On lit sur la figure ci-après que cet angle d'incidence vaut $i = 60^\circ$.

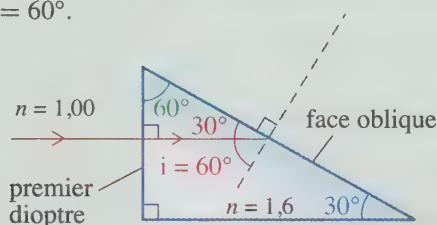


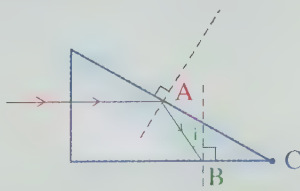
Figure 3.24 – Détermination de l'angle d'incidence du rayon sur la face oblique.

En écrivant la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, on a :

$$1,6 \times \sin 60^\circ = 1,0 \times \sin i',$$

où i' serait l'angle d'émergence de la face oblique. On obtient, en calculant l'expression ci-dessus : $\sin i' = 1,386 > 1$. Or un sinus ne peut jamais être supérieur à un. Il est donc impossible que l'on ait réfraction et il y a donc réflexion totale du rayon sur la face oblique.

- 3 Cherchons tout d'abord avec quel angle d'incidence le rayon, qui vient d'être totalement réfléchi sur la face oblique, arrive sur la face inférieure. Dans le triangle ABC, l'angle $\hat{B}AC$ vaut 30° , et l'angle $\hat{ACB}$ vaut également 30° .



Donc $\hat{C}BA + 30^\circ + 30^\circ = 180^\circ$ et finalement $\hat{C}BA = 120^\circ$.

Or $\hat{C}BA = 90^\circ + i$, donc $i = 120^\circ - 90^\circ = 30^\circ$. Le rayon arrive donc sous une incidence de trente degrés sur la face inférieure. Écrivons la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction sur cette face inférieure. Cela donne :

$$1,6 \times \sin 30^\circ = 1,0 \times \sin i' \quad \text{soit} \quad \sin i' = 0,8.$$

En utilisant la touche $\sin^{-1}$ ou **arcsin** de la calculatrice, on obtient :

$$i' \approx 53^\circ.$$

L'angle d'émergence du rayon est de 53° , comme indiqué sur la figure ci-après.

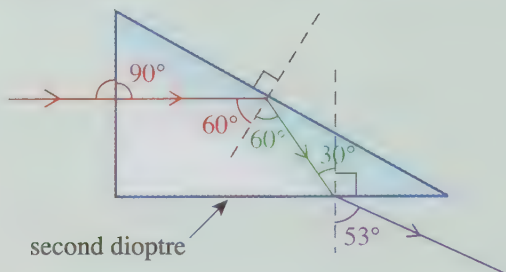


Figure 3.25 – Marche du rayon depuis son entrée jusqu'à sa sortie du prisme.

14 Aquarium

➔ **Énoncé**
p. 65

Lycée du Parc des Loges, Évry

- 1** L'indice de réfraction d'un milieu est donné par : $n = \frac{c}{v}$.

Ici, nous avons :

$$n = \frac{3,00 \times 10^8}{2,25 \times 10^8} \approx 1,33.$$

- 2** La situation est représentée sur la figure ci-après.
On écrit la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction au franchissement du dioptre air/eau : $n_{\text{eau}} \sin i = n_{\text{air}} \sin i'$.

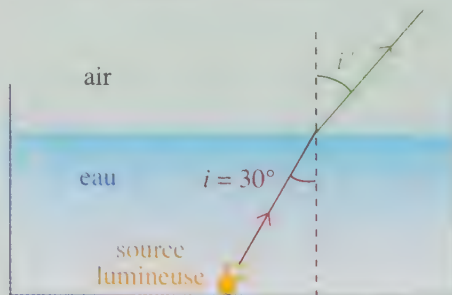


Figure 3.26 – Marche du rayon issu du projecteur.

$$\text{Donc : } \sin i' = \frac{1,33}{1,00} \times \sin 30^\circ \approx 0,66.$$

On en déduit la valeur de i' en degrés en appuyant sur la touche $\sin^{-1}$ ou les touches **inv** **sin** ou encore **arcsin** de la calculatrice, selon le modèle. On trouve :

$$i' \approx 41^\circ.$$

15 Demi-cylindre

Enoncé
p. 65

Lycée Arago, Paris

- 1 Le matériau constituant le demi-cylindre est dispersif car son indice de réfraction dépend de la longueur d'onde.
- 2 Une estimation de la vitesse de propagation v_b de la lumière violette dans ce milieu peut être donnée en utilisant l'indice de réfraction à 400 nm : $n_v = 1,42$.

Nous avons :

$$v_v = \frac{c}{n_b}$$

Application numérique :

$$v_v = \frac{3,00 \times 10^8}{1,42} = 2,11 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- 3 Le calcul est similaire pour la lumière rouge. On utilise l'indice de réfraction de ce matériau dans le rouge, $n_r = 1,51$.

Application numérique :

$$v_r = \frac{3,00 \times 10^8}{1,51} = 1,99 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

- 4 (a) Commençons par déterminer la marche des rayons rouges qui pénètrent dans le demi-cylindre.

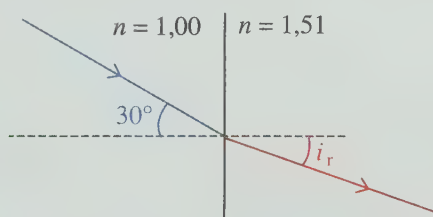


Figure 3.27 – Marche d'un rayon de lumière rouge.

La loi de Snell-Descartes relative à la réfraction s'écrit, pour un rayon rouge qui franchit le dioptré air/matériau :

$$n_{\text{air}} \sin 30^\circ = n_r \sin i_r,$$

où i_r est l'angle d'émergence des rayons rouges après réfraction, et où l'indice de réfraction de l'air, n_{air} , vaut 1.

Application numérique :

$$\sin i_r = \frac{1,00 \times \sin 30^\circ}{1,51} = 0,331.$$

On en déduit l'angle i_r en appuyant sur la touche **sin⁻¹** ou successivement sur les touches **inv** puis **sin**, ou directement sur la touche **arcsin** si elle existe, selon les modèles de calculatrice. Notons que dans le résultat intermédiaire ci-dessus, nous avons gardé un chiffre significatif de plus que ce que nous autorise la précision des données de l'énoncé (l'angle d'incidence du faisceau est donné

avec deux chiffres significatifs), ceci afin d'éviter le cumul d'erreurs d'arrondi. Nous obtenons en définitive :

$$i_r = \sin^{-1} 0,331 = 19,3^\circ \approx 19^\circ.$$

Remarque : pour éviter une dégradation de la précision au cours du calcul intermédiaire, on peut calculer directement i_r en prenant son sinus inverse à la calculatrice une fois que celle-ci affiche le résultat de $\sin 30^\circ / n$.

ATTENTION

Après la traversée de ce premier dioptré, le rayon franchit à nouveau un dioptré matériau/air, sur la partie circulaire du demi-cylindre. Il a alors une incidence normale, et n'est donc pas dévié.

Nous pouvons effectuer un calcul similaire pour la lumière violette.

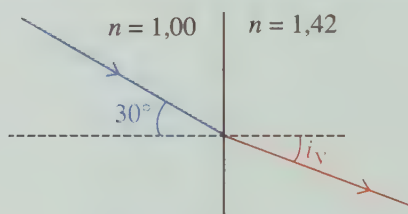


Figure 3.28 – Marche d'un rayon de lumière violette.

Application numérique :

$$\sin i_v = \frac{1,00 \times \sin 30^\circ}{1,42} = 0,352$$

donc : $i_v = \sin^{-1} 0,352 = 20,6^\circ \approx 21^\circ$.

On voit que la lumière rouge est plus déviée que la lumière violette : le rouge se trouve en haut du faisceau en sortie du demi-cylindre.

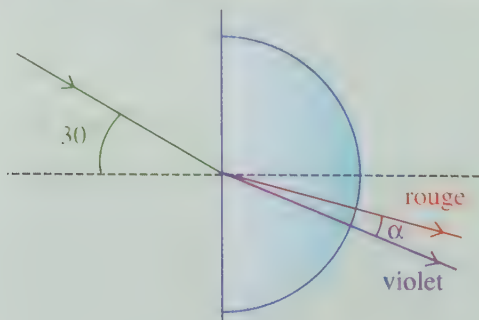


Figure 3.29 – Étalement des couleurs donné par le prisme.

- (b) L'angle α d'ouverture du faisceau est donné par la différence des angles d'émergence dans le violet et dans le rouge.

$$\alpha = i_b - i_r.$$

Comme il s'agit de la différence de nombres presque égaux, on prend leur valeur avec trois chiffres significatifs pour effectuer l'application numérique, et on en garde deux dans le résultat final :

$$\alpha = 20,6 - 19,3 = 1,3^\circ.$$

L'angle d'ouverture du faisceau est de $1,3^\circ$.

16 Projecteur dans un bassin

Enoncé
p. 66

Lycée Pasteur, Neuilly

- 1 La situation est schématiquement représentée à la figure ci-dessous. On a représenté un rayon émis par le projecteur qui arrive sous la surface de l'eau avec un angle d'incidence i . Nous avons à calculer i' dans les trois cas $i = 0^\circ$, $i = 20^\circ$ et $i = 40^\circ$.

La loi de Snell-Descartes relative à la réfraction donne :

$$n_{\text{eau}} \sin i = n_{\text{air}} \sin i'.$$

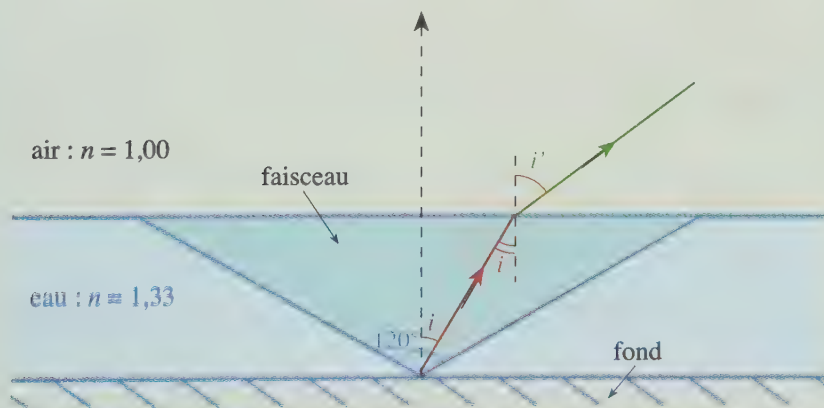


Figure 3.30 – Notation relative aux rayons incident et transmis.

Pour $i = 0^\circ$, on obtient $i' = 0^\circ$. Le rayon qui frappe perpendiculairement la surface n'est pas dévié. Pour $i = 20^\circ$, on trouve : $i' = 27^\circ$, et pour $i = 40^\circ$, on trouve $i' = 59^\circ$.

Les rayons correspondants sont tracés sur la figure ci-après.

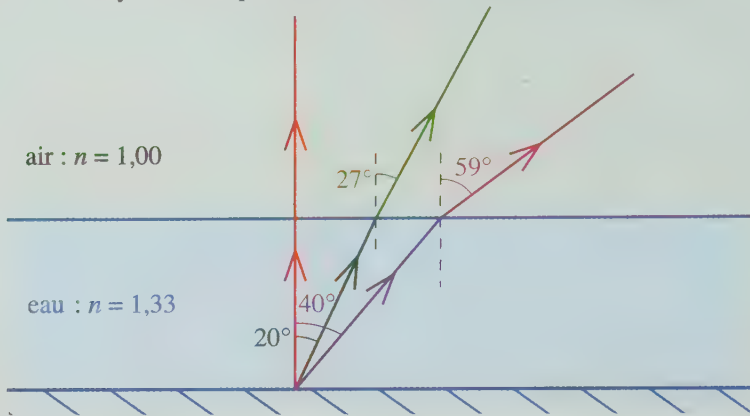


Figure 3.31 – Marche des rayons d'incidence 20 et 40 degrés.

- 2** L'angle de réfraction limite i_l est atteint quand $\sin i' = 1$, donc :

$$\sin i_l = \frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau}}},$$

ce qui s'écrit encore : $\sin i_l = \frac{1,00}{1,33}$. Cela donne : $i_l = 49^\circ$.

Tous les rayons qui arrivent sous la surface avec une incidence supérieure à 49° sont totalement réfléchis.

- 3** On a représenté l'ensemble des rayons totalement réfléchis sur la figure ci-après :

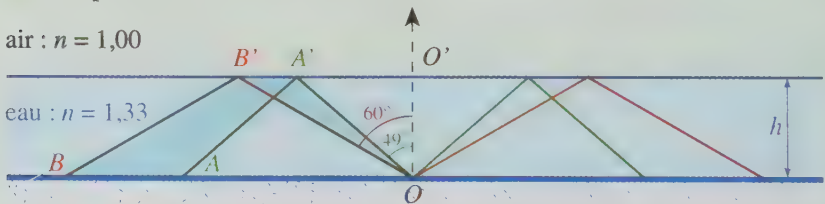


Figure 3.32 – Marche des rayons donnant lieu à une réflexion totale.

L'ensemble des rayons du faisceau qui sont totalement réfléchis est représenté en grisé. Comme toute l'énergie lumineuse est renvoyée vers le fond, les points situés entre A et B sont fortement illuminés. Puisque la situation réelle est obtenue en faisant pivoter la figure autour de l'axe vertical passant par le projecteur, le segment $[AB]$ correspond en fait à un anneau. Le fond est donc fortement illuminé sur un anneau, dont le rayon extérieur est la distance OB . Cette distance est le double de la distance $O'B'$, qui vaut : $O'B' = h \times \tan 60^\circ$, donc

$$OB = 2 \times h \times \tan 60^\circ.$$

L'application numérique donne : $OB = 2,8 \text{ m}$.

Le rayon extérieur de l'anneau est 2,8 m.

17 Profondeur apparente d'une piscine

Enoncé
p. 67

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

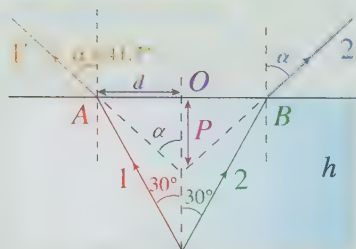


Figure 3.33 – Marche des rayons 1 et 2, qui semblent, pour un observateur situé au-dessus de la surface, provenir du point P.

L'angle d'émergence α des rayons 1' et 2' est donné par la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction. On a :

$$1,33 \times \sin 30^\circ = 1,00 \times \sin \alpha,$$

d'où l'on tire : $\alpha = 41,7^\circ$.

La distance entre les points O et A est donnée par

$$d = h \times \tan 30^\circ = 1,73 \text{ m},$$

donc la distance AB vaut le double, soit : $AB = 3,46 \text{ m}$. La profondeur P à laquelle les rayons 1' et 2' s'intersectent est donnée, comme on peut le lire sur la figure, par :

$$d = P \times \tan \alpha,$$

ce qui conduit à :

$$P = \frac{d}{\tan \alpha} = 1,94 \text{ m}.$$

La piscine a donc une profondeur apparente d'environ 2 m au lieu de 3 m.

MÉTHODE

À travers un dioptre air/eau (qu'il s'agisse de la surface d'une piscine ou du dioptre existant au niveau d'un masque de plongée), les objets apparaissent donc environ 33 % plus près qu'ils ne sont en réalité.

18 Fibre optique

Enoncé
p. 67

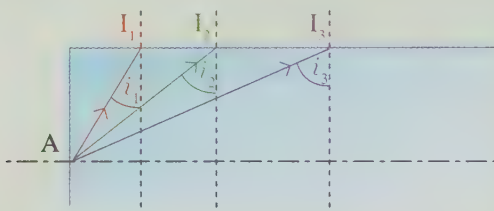
Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

- 1 Les rayons lumineux se propagent dans le verre : il est transparent. Ils s'y propagent en ligne droite : c'est donc un milieu homogène.
- 2 Les ondes lumineuses sont des ondes électromagnétiques. D'autres exemples de ces ondes sont les ondes radio, ou les radiations ultraviolettes.

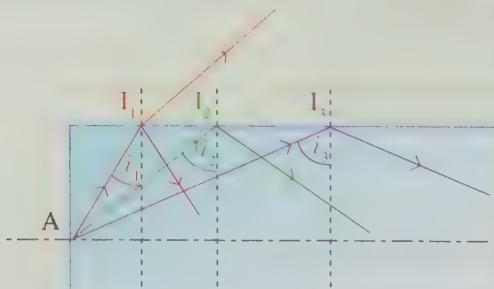
- 3 • Une réflexion totale peut se produire à la surface de séparation entre un premier milieu et un second milieu si l'indice de réfraction du premier milieu est supérieur à celui du second.
- Dans ce cas, il y a réflexion totale pour tous les rayons dont l'angle d'incidence sur la surface de séparation est supérieur à un angle limite i_L donné par :

$$\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}.$$

- 4 La première des deux conditions ci-dessus est forcément respectée. Il ne serait pas possible de guider la lumière dans la fibre optique si certains rayons ne subissaient pas de réflexion totale.
- 5 L'angle d'incidence i_1 est inférieur à i_2 , tandis que i_3 est supérieur à i_2 , comme on le voit sur la figure ci-après.



- 6 L'angle de réfraction en I_2 vaut 90° . C'est la plus grande valeur possible de l'angle d'émergence du rayon, ce qui implique que pour toute valeur de l'angle d'incidence supérieure à i_2 , on n'a pas de rayon réfracté : il y a alors réflexion totale.
- 7 Par conséquent, il n'y a pas de réflexion totale au point I_1 , puisque $i_1 < i_2 = i_L$. En revanche, puisque l'on a $i_3 > i_2 = i_L$, il y a réflexion totale au point I_3 .
- 8 On résume ces différentes conclusions sur le schéma ci-après.



On veille à ce que l'angle du rayon réfléchi soit, dans chaque cas, égal à l'angle du rayon incident. Au point I_1 , l'angle d'émergence du rayon réfracté est supérieur à i_1 , puisque l'indice de réfraction du milieu extérieur est inférieur à celui du verre de la fibre.

19 Spectre de la lumière blanche

Enoncé
p. 68

Lycée Saint-Exupéry, Lyon

Au franchissement du dioptre air/verre, les différents rayons constituant le pinceau de lumière blanche sont réfractés. Comme la lumière blanche contient un mélange de toutes les couleurs, du rouge au violet, et puisque les indices de réfraction du verre sont différents pour chaque fréquence (c'est-à-dire pour chaque couleur), les rayons de différentes couleurs constituant le pinceau sont séparés et projetés en différents points de l'écran, sur lequel on observe donc le *spectre* de la lumière blanche.

Pour savoir de quel côté se trouve le rouge, qui est à l'une des extrémités du spectre, il faut savoir quelle est la couleur la plus (resp. la moins) réfractée. Le rouge est la couleur qui a la plus basse fréquence, donc, puisque les constantes a et b de l'énoncé sont positives, c'est dans le rouge que le verre a l'indice de réfraction le plus bas. Les rayons rouges sont donc les moins réfractés, donc le rouge est observé le plus loin de l'axe normal au plan d'incidence. Réciproquement, le violet, qui est le plus fortement réfracté, est observé au plus près de cet axe :

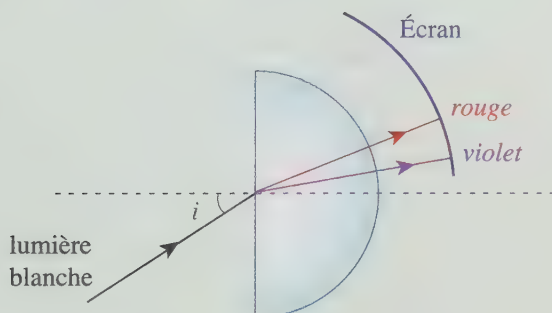


Figure 3.34 – Dispersion des couleurs dans le demi-cylindre.

20 Étude d'un prisme simplifié

Enoncé
p. 68

Lycée Montaigne, Bordeaux

- 1 La lumière blanche est un mélange équilibré de l'ensemble des radiations du spectre visible. Toutes les longueurs d'onde du spectre visible sont représentées dans la lumière blanche.
- 2 La longueur d'onde de cette onde se situe dans la partie rouge du spectre visible. Il s'agit donc d'une radiation de couleur rouge. Pour cette longueur d'onde l'indice du matériau est, en utilisant la formule donnée dans l'énoncé :

$$n_a = 1,200 + \frac{70}{650} = 1,308.$$

L'angle d'incidence du rayon sur la face oblique vaut 45° . En écrivant la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, on obtient :

$$1,308 \times \sin 45^\circ = 1,00 \times \sin i'_a,$$

où i'_a est l'angle d'émergence.

Tous calculs faits, on obtient $\sin i'_a = 0,9249$ soit $i'_a = 67,7^\circ$.

Le rayon émergent est représenté sur la figure qui suit.

- 3** Il s'agit d'une radiation de couleur violette, située à l'extrémité des hautes fréquences du spectre visible. L'indice n_b du matériau pour cette onde est :

$$n_b = 1,200 + \frac{70}{400} = 1,375.$$

En écrivant comme précédemment la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, et en développant le calcul de manière analogue, on obtient que l'angle d'émergence vaut $i'_b = 76,5^\circ$. Le rayon émergent est représenté ci-après, sur la même figure.

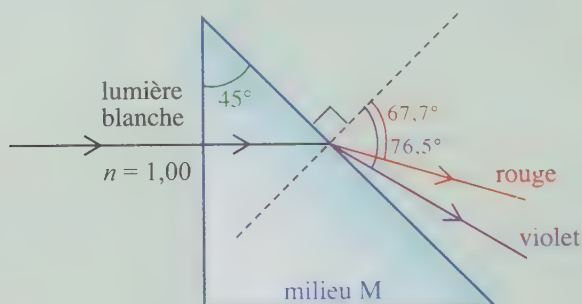


Figure 3.35 – Marche des rayons rouge et violet.

- 4** Si on projette le faisceau émergent sur un écran, on voit que toutes les radiations ne vont pas arriver au même endroit et sont étalées en fonction de leur longueur d'onde. On voit donc sur l'écran un spectre de la lumière blanche, c'est-à-dire l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel. Cet exercice montre qu'un milieu dispersif (c'est-à-dire où l'indice dépend de la longueur d'onde) permet de « trier en sortie » les radiations selon leur longueur d'onde et donc d'obtenir des spectres. C'est le principe d'un prisme de verre ordinaire.

21 Réfraction atmosphérique

Enoncé
p. 69

Lycée Notre-Dame du Grandchamp, Versailles

- 1** (a) L'indice de réfraction du vide vaut $n_0 = 1$.
(b) On écrit la relation de Snell-Descartes à la traversée du dioptré vide-atmosphère :

$$n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \alpha' \quad \text{c.-à-d.} \quad \sin \alpha = n_1 \sin \alpha'.$$

- (c) L'application numérique donne :

$$\sin \alpha' = \frac{\sin 70^\circ}{1,0003} = 0,9394108,$$

d'où l'on déduit :

$$\alpha' = 69,95^\circ.$$

- (d) La différence entre cet angle et l'angle d'incidence (c.-à-d. l'angle dont est dévié le rayon) est :

$$\Delta \alpha = \alpha' - \alpha = -0,047^\circ = -2,8'.$$

Le rayon incident est dévié, en direction du zénith, d'un angle de 2,8 minutes d'arc.

- (e) Puisque le rayon incident est dévié en direction du zénith, il devient « plus vertical » lors de son entrée dans l'atmosphère. L'étoile apparaît donc plus haute qu'elle ne l'est en réalité.

- 2** En utilisant les notations de la figure de l'énoncé, on écrit les trois relations de Snell-Descartes aux trois différents dioptries qui apparaissent sur la figure :

$$\sin \alpha = n_3 \sin \alpha_3$$

$$n_3 \sin \alpha_3 = n_2 \sin \alpha_2$$

$$n_2 \sin \alpha_2 = n_1 \sin \alpha'$$

Des deux premières égalités on déduit :

$$\sin \alpha = n_2 \sin \alpha_2.$$

En remplaçant le membre de droite par le membre de droite de la dernière égalité, on obtient :

$$\sin \alpha = n_1 \sin \alpha'.$$

On retrouve l'égalité vue précédemment. Ceci nous indique que seul importe l'indice de réfraction de l'atmosphère au niveau du sol pour déterminer la déviation finale d'un rayon lumineux issu d'un objet astronomique.

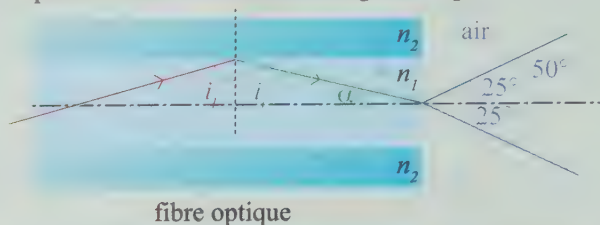
22 Fibroscopie

➔ Enoncé
p. 70

Lycée Saint-Louis, Paris

- 1** (a) Le faisceau d'éclairage a pour fonction de guider les rayons d'une source lumineuse externe vers l'intérieur du corps humain, de manière à pouvoir illuminer les organes que l'on souhaite examiner.
- (b) Pour que l'on puisse avoir réflexion totale d'un rayon sur un dioptre, il est nécessaire que le rayon incident arrive sur un milieu d'indice de réfraction inférieur à celui dans lequel il se propage. Il est donc nécessaire d'avoir $n_1 > n_2$.

(c) Nous représentons la situation sur la figure ci-après.



fibres optiques

L'angle α est maximum lorsque l'angle d'incidence entre les milieux d'indice n_1 et n_2 est minimum donc lorsqu'il vaut i_l (c'est l'angle minimal pour avoir réflexion totale). Les rayons qui émergent de la fibre avec un angle de 25° sont donc ceux qui, dans le cœur de la fibre, possèdent l'angle limite i_l pour la réflexion totale sur le matériau d'indice n_2 . Nous écrivons la loi de Snell-Descartes au dioptré de sortie :

$$n_1 \sin \alpha = \sin 25^\circ,$$

où nous faisons l'approximation, parfaitement justifiée compte-tenu de la précision des indications de l'énoncé, que l'indice de réfraction de l'air est égal à un. Par ailleurs, nous écrivons la loi de Snell-Descartes au dioptré entre les surfaces d'indice n_1 et n_2 , ce qui nous donne :

$$n_1 \sin i_l = n_2.$$

Puisque i_l est l'angle limite pour la réflexion totale, il correspondrait à un rayon dans le milieu d'indice n_2 ayant un angle d'émergence de 90° , dont le sinus est égal à un, raison pour laquelle on écrit simplement l'indice de réfraction dans le membre de droite de l'égalité ci-dessus.

Enfin, nous devons écrire une troisième relation, qui lie les angles α et i_l . Ils sont les deux angles non droits d'un triangle rectangle, donc nous pouvons écrire :

$$i_l + \alpha = 90^\circ.$$

Pour connaître la valeur numérique de n_2 , nous pouvons effectuer les applications numériques de proche en proche, de manière à déterminer α , puis i_l et enfin n_2 , en utilisant les égalités ci-dessus. Nous pouvons également obtenir une expression analytique directement pour n_2 , de la manière suivante :

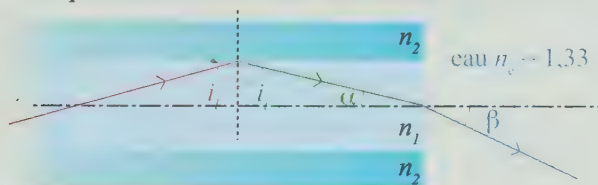
$$\begin{aligned} n_2 &= n_1 \sin i_l \\ &= n_1 \sin (90^\circ - \alpha) \\ &= n_1 \cos \alpha \\ &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} \\ &= n_1 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 25^\circ}{n_1^2}} \\ &= \sqrt{n_1^2 - \sin^2 25^\circ} \end{aligned}$$

Application numérique :

$$n_2 = \sqrt{1,50^2 - 0,42^2} = 1,44.$$

On retrouve bien le fait que $n_2 < n_1$. En outre on voit que, plus l'ouverture du faisceau d'éclairage est petite, plus l'indice de réfraction n_2 s'approche de la valeur de n_1 .

- (d) Lorsque l'extrémité du fibroscope se trouve dans l'eau, tout ce qui se passe à l'intérieur de la fibre est inchangé (même angle limite i_l , et par conséquent même angle α), mais la relation de Snell-Descartes que nous écrivons au sortir de la fibre est différente.



Nous cherchons l'angle β , qui est donné par :

$$n_1 \sin \alpha = n_e \sin \beta.$$

Nous pourrions, pour l'évaluer, calculer dans un premier temps la valeur de α à partir de la question précédente. Toutefois, il est plus judicieux d'utiliser la relation :

$$n_1 \sin \alpha = \sin 25^\circ$$

pour écrire directement :

$$n_e \sin \beta = \sin 25^\circ \quad \text{soit :} \quad \sin \beta = \frac{\sin 25^\circ}{n_e}.$$

Application numérique :

$$\sin \beta = \frac{0,42}{1,33} = 0,32$$

donc :

$$\beta = 19^\circ.$$

Par conséquent l'angle d'ouverture au sommet du faisceau d'éclairage est $2\beta = 38^\circ$.

- 2** (a) La fonction du faisceau d'imagerie est de transmettre à l'extérieur du corps du patient l'image de l'intérieur d'un organe formée par un dispositif optique sur l'extrémité du fibroscope.
- (b) Chaque fibre optique ne peut transmettre que la valeur d'un « pixel » de l'image. Pour disposer en sortie d'une image de qualité suffisante, il est donc nécessaire d'utiliser un grand nombre de fibres optiques.
- (c) L'image donnée par le fibroscope est une image de 200×200 pixels, ce qui signifie que le faisceau d'imagerie comporte également 200×200 fibres disposées en carré. Le côté a du carré est donné par : $a = (3,0 + 1,0) \times 200 = 8,0 \times 10^2 \mu\text{m}$, et sa diagonale d vaut donc :

$$d = \sqrt{2}a = 1,1 \times 10^3 \mu\text{m} = 1,1 \text{ mm}.$$

Le diamètre D de la gaine du fibroscope vaut par conséquent :

$$D = 1,18 \times d = 1,3 \text{ mm.}$$

Nous gardons deux chiffres significatifs compte-tenu de la précision des données de l'énoncé.

23 Angle de Brewster

Lycée Montaigne, Bordeaux

Enoncé
p. 71

La situation est représentée sur la figure ci-dessous.

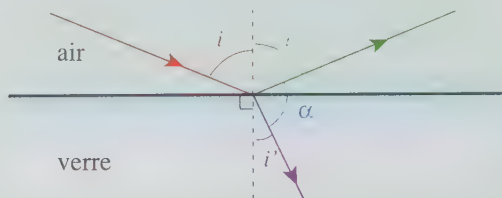


Figure 3.36 – Le rayon transmis est perpendiculaire au rayon réfléchi.

On constate que l'angle α est donné par :

$$i + \alpha + i' = 180^\circ$$

donc, puisqu'on veut avoir $\alpha = 90^\circ$, on doit avoir la relation :

$$i + i' = 90^\circ.$$

En outre, on a la relation de Snell-Descartes relative à la réfraction :

$$n_{\text{air}} \sin i = n_{\text{verre}} \sin i'$$

qui s'écrit ici, compte tenu de la relation entre i et i' :

$$n_{\text{air}} \sin i = n_{\text{verre}} \sin(90^\circ - i).$$

Or $\sin(90^\circ - i) = \cos i$ et $\tan i = \frac{\sin i}{\cos i}$ donc on peut écrire la relation ci-dessus sous la forme :

$$\tan i = \frac{n_{\text{verre}}}{n_{\text{air}}}.$$

Ici, l'application numérique donne, en utilisant la touche $\tan^{-1}$ ou $\arctan$ de la calculatrice :

$$i = 56,3^\circ.$$

L'angle de Brewster pour une réflexion sur du verre est donc de 56° .

Les messages de la lumière

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Ondes lumineuses et longueur d'onde
3. Rayonnement émis par un corps chaud
4. Notions de spectroscopie

Thème : l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Michelet, Marseille

On étudie le spectre de la lumière visible et proche ultraviolet émise par l'étoile Véga, obtenu avec un spectroscopie à réseau. Il a l'allure représentée sur la figure ci-dessous.

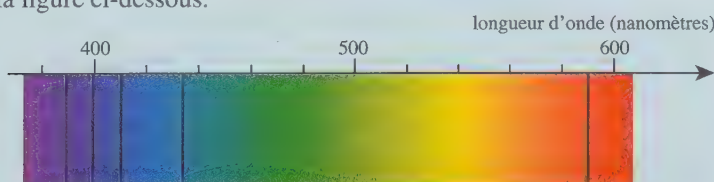


Figure 4.1 – Spectre visible de l'étoile Véga.

- 1 Comment appelle-t-on les bandes sombres sur ce spectre ?
- 2 Quels éléments ou espèces permettent-ils d'identifier ?

Données :

- Longueur d'onde d'une transition du fer : $\lambda = 425 \text{ nm}$.
- Longueurs d'onde de certaines transitions de l'hydrogène :
 $\lambda = 388,9 \text{ nm}$ (transition $H\zeta$) $\lambda = 434,1 \text{ nm}$ (transition $H\gamma$)
 $\lambda = 397,0 \text{ nm}$ (transition $H\epsilon$) $\lambda = 486,1 \text{ nm}$ (transition $H\beta$)
 $\lambda = 410,2 \text{ nm}$ (transition $H\delta$)
- Longueur d'onde d'une transition du baryum : $\lambda = 455,4 \text{ nm}$.
- Longueur d'onde d'une transition du monoxyde titane (TiO) : $\lambda = 476,1 \text{ nm}$.
- Longueurs d'onde de certaines transitions du sodium :
 $\lambda = 589,0 \text{ nm}$ (doublet I D du sodium)
 $\lambda = 589,6 \text{ nm}$ (doublet I D du sodium)

Voir corrigé page 98

2 Ondes lumineuses et longueur d'onde

La lumière visible est une onde, appelée onde électromagnétique.

À chaque couleur est associé un nombre appelé longueur d'onde, exprimé généralement en nanomètre (nm), qui caractérise la radiation. Pour la lumière visible, la longueur d'onde est comprise entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).

Plus formellement la longueur d'onde est la distance parcourue par l'onde en une période T :

$$\lambda = c \times T$$

On rappelle qu'une radiation monochromatique comporte une seule longueur d'onde tandis qu'une radiation polychromatique en comporte plusieurs.

Remarque : notons que les radiations visibles ne correspondent qu'à une petite partie d'un ensemble de radiations appelées radiations électromagnétiques (ou encore ondes électromagnétiques).

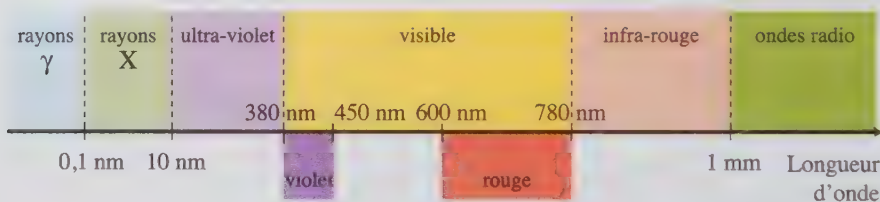


Figure 4.2 – Domaines du spectre électromagnétique.

3 Rayonnement émis par un corps chaud

3.1 Définitions

Définition 1

Le spectre d'un objet est l'ensemble des radiations émises par cet objet.

Le spectre d'un objet peut apporter des informations sur les propriétés physique de celui-ci.

À RETENIR

Un corps chauffé (appelé « corps chaud » ou « corps noir ») émet un rayonnement continu dont la couleur dépend de la température.

Le spectre d'un tel objet est dit continu car toutes les longueurs d'ondes sont

représentées. Le Soleil est une bonne approximation de corps chaud. Son spectre visible est celui donné par un arc-en-ciel : celui-ci contient toutes les couleurs. Il est continu.



Comportement d'un spectre de corps chaud en fonction de la température

Plus la température d'un corps augmente, plus l'intensité totale des radiations émises par le corps augmente et plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde.

Exemple : à la température ambiante, les corps chauds (le livre que vous avez entre les mains peut être considéré comme un corps chaud) émettent un rayonnement continu à des longueurs d'onde qui ne correspondent pas à la lumière visible (on peut en revanche observer ce rayonnement avec des caméras infrarouges).

Un morceau de fer porté à une température supérieure à 500 °C émet un spectre continu contenant des radiations visibles de grande longueur d'onde. Il apparaît rougeoyant (on dit qu'il est porté au rouge). C'est essentiellement la température du corps chaud qui détermine les propriétés de ce rayonnement, et très peu ses autres propriétés physiques. Ainsi, les morceaux de bois (un matériau qui n'a rien à voir avec le fer) portés à haute température dans une cheminée sont également rougeoyants (les braises).

À plus haute température encore, le spectre des radiations émises par un corps chaud s'enrichit de radiations de plus courtes longueur d'onde. Toutes les radiations du domaine visible sont alors représentées et il apparaît blanc. C'est le cas par exemple d'un filament de tungstène, porté à une température d'environ 3 500 °C dans une ampoule à incandescence.

Nous avons représenté sur la figure ci-dessous les spectres de trois corps chauds à trois températures différentes.

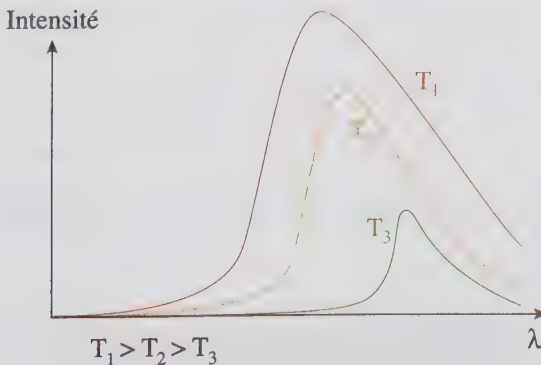


Figure 4.3 – Spectres de corps chauds.

Exemple : les deux étoiles les plus brillantes de la constellation d'Orion sont Rigel (étoile bleue) et Bételgeuse (étoile rouge). Le spectre de Rigel est plus riche en courtes longueurs d'ondes donc Rigel est une étoile plus chaude que Bételgeuse.

À RETENIR

Plus la température d'une étoile est élevée, plus la couleur perçue correspond à des petites longueurs d'onde.

Notions de spectroscopie

Comment obtenir un spectre ?

Pour obtenir le spectre émis par une source, c'est-à-dire pour décomposer, trier la lumière qui en parvient en fonction de la longueur d'onde, on peut utiliser deux types de dispositifs :

- Un prisme (nous reverrons ceci en exercice) ;
- Un réseau, qui est un dispositif sur lequel sont gravées des rayures très fines et très serrées, dont la séparation est de l'ordre de la longueur d'onde, et qui a la propriété de décomposer la lumière qui le traverse.

On appelle dispersion le fait qu'une radiation polychromatique est séparée (dispersée) en ses diverses composantes monochromatiques lorsqu'elle entre dans un milieu donné. Un tel milieu, pour lequel l'indice de réfraction, qui détermine le chemin d'un rayon donné, dépend donc nécessairement de la longueur d'onde, est appelé milieu dispersif.

Spectres d'émission

Un corps chaud, dense et opaque, a un spectre d'émission continu, contenant toutes les couleurs comme nous l'avons vu au début de ce chapitre.

Une vapeur chaude et diluée, à basse pression, n'émet en revanche que quelques couleurs seulement. Son spectre est donc uniquement constitué de raies brillantes ou raies d'émission. Il est également possible de faire en sorte qu'un gaz dilué émette un spectre d'émission en l'excitant par une décharge électrique.

Les longueurs d'ondes des radiations émises sont caractéristiques des espèces chimiques présentes.

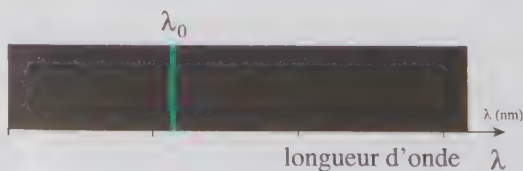


Figure 4.4 – Exemple de spectre d'émission.

Exemple : le spectre des lampadaires « oranges » est un spectre d'émission. Ces lampes contiennent de la vapeur de sodium chauffée, qui donne un spectre de raies d'émission dont la longueur d'onde est caractéristique du sodium.

📺 Spectre d'absorption

Si on interpose un milieu froid et dilué devant un corps chaud qui émet une lumière blanche, on obtient un spectre d'absorption.

Le milieu froid absorbe sélectivement certaines longueurs d'onde caractéristiques des atomes ou molécules qui la composent. À ces longueurs d'onde, nous voyons dans le spectre des raies sombres, ou raies d'absorption.

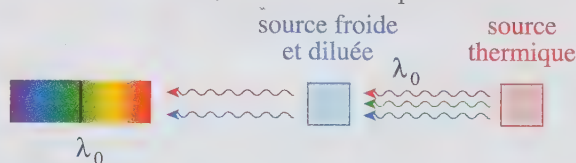


Figure 4.5 – Exemple de réalisation de spectre d'absorption.

Le spectre obtenu a l'allure suivante :

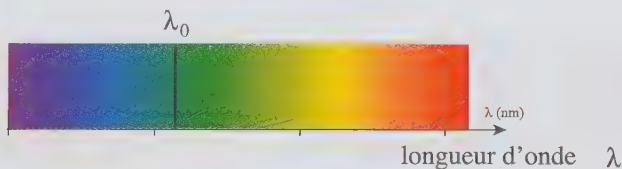


Figure 4.6 – Exemple de spectre d'absorption.

La raie d'absorption y apparaît comme une raie (ou bande) sombre.

Remarque : la longueur d'onde des raies d'absorption est la même que la longueur d'onde des raies d'émission. Ainsi, une raie caractéristique d'une espèce donnée apparaîtra soit en absorption (si elle se trouve dans un milieu dilué devant un corps chaud émettant un rayonnement continu), soit en émission (si elle se trouve dans un milieu chaud et dilué, en l'absence de corps chaud en arrière-plan).

4.4 Applications à l'astrophysique : spectre des étoiles

De manière générale, le spectre d'une étoile peut se considérer en première approximation comme le spectre d'une source « froide » et diluée (l'atmosphère de l'étoile), superposée devant une source thermique (correspondant aux couches plus internes de l'étoile, plus chaudes que la photosphère). Ainsi, en général une étoile possède des raies d'absorption dans son spectre. Nous verrons toutefois des exceptions en exercice.

Puisque les longueurs d'onde d'absorption ou d'émission des raies dans les spectres sont caractéristiques de la composition chimique du milieu émetteur ou absorbant, on peut déduire la composition chimique d'un astre simplement par l'étude de son spectre.

Remarque : notons que la spectroscopie ne nous renseigne pas seulement sur la composition qualitative des astres. L'étude de la forme précise des raies d'absorption dans le spectre d'une étoile nous renseigne sur le profil de température dans son atmosphère, l'intensité de la pesanteur à sa surface, la pression des gaz, la valeur du champ magnétique s'il y en a, la vitesse à laquelle l'étoile s'approche ou s'éloigne de l'observateur, etc. Les informations fournies par la spectroscopie sont donc d'une grande richesse et d'une extrême importance pour l'Astrophysique.

Solution de l'exercice type

Lycée Michelet, Marseille

1 Les bandes sombres figurant sur ce spectre sont appelées des raies d'absorption. Elles constituent une signature des espèces présentes dans l'atmosphère de l'étoile.

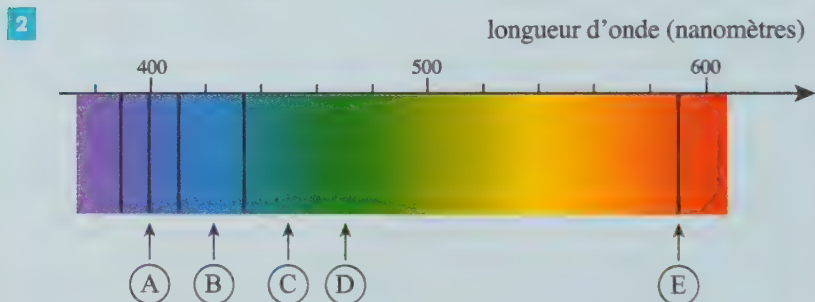


Figure 4.7 – Identification des raies du spectre de Véga.

On reporte sur le spectre les longueurs d'ondes (flèches A à E) des différents types d'atomes mentionnés dans l'énoncé. On ne reporte pas toutes les raies correspondant à un élément : il suffit de trouver une raie d'absorption à une certaine longueur d'onde pour conclure à la présence de cet élément.

On voit ainsi que les raies A et E sont présentes. Il s'agit respectivement de l'hydrogène et du sodium, qui sont donc identifiés dans l'atmosphère de Véga.

En revanche, on peut vérifier facilement que ni les éléments fer (flèche B), baryum (flèche C), ni l'espèce monoxyde de titane (flèche D) ne sont détectées, au moins aux transitions données dans l'énoncé. Les autres raies importantes sur ce spectre peuvent être aisément identifiées comme d'autres signatures spectrales de l'hydrogène.

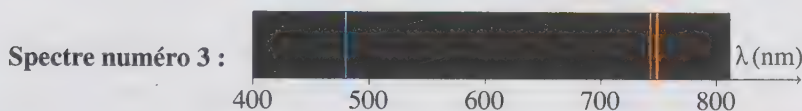
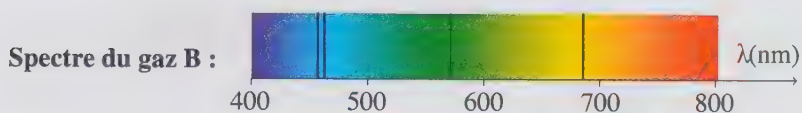
Voir énoncé page 93

1 QCM Testez vos connaissances

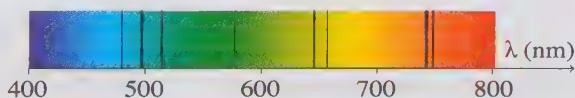
15 min

 Corrigé
p. 107

On considère les trois spectres ci-dessous :



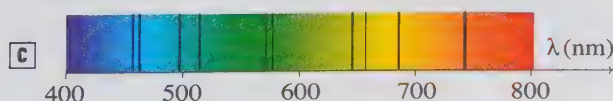
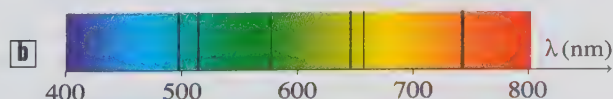
- 1 Le spectre du gaz A est un spectre d'émission.
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 2 La lumière qui a donné lieu au spectre du gaz B est une lumière blanche.
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 3 Le spectre numéro 3 est un spectre d'émission.
☐ a Vrai ☐ b Faux
- 4 Le gaz à partir duquel on a obtenu le spectre numéro 3 est :
☐ a Le gaz A ☐ b Le gaz B ☐ c On ne peut pas conclure
- 5 On considère à présent le spectre suivant :



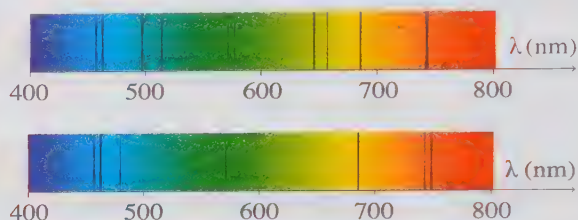
Le milieu froid et dilué qui a donné lieu aux raies sombres contient

- ☐
- a le gaz A
- ☐
- b le gaz B

- 6 Nous admettons que le milieu qui a donné lieu au spectre de la question précédente contient en outre un autre gaz : le gaz C.
 Quel pourrait être le spectre du gaz C ?



- 7** Nous considérons enfin les deux spectres suivants, correspondant chacun à un mélange de deux gaz.



Quel gaz ont en commun les deux mélanges ?

- ☐ a Le gaz A ☐ b Le gaz B ☐ c Le gaz C ☐ d aucun

2 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 107

- 1** La longueur d'onde de la lumière visible est de l'ordre du :
☐ a nanomètre ☐ b micromètre ☐ c millimètre
- 2** Les rayons ultraviolets ont une longueur d'onde
☐ a plus courte ☐ b plus longue
 que les rayons visibles.
- 3** Un laser émet une onde monochromatique dont la longueur d'onde est, dans l'air, $\lambda = 1\,029,4\text{ nm}$. Le rayon issu du laser est-il visible ?
☐ a oui ☐ b non

3 Domaines de longueurs d'onde



2 min

Corrigé
p. 107

Lycée Jean Guehenno, Flers

Classer par ordre de longueur d'onde croissante les radiations suivantes :

Lumière bleue, radiation infrarouge, radiation ultraviolette, lumière jaune.

4 Couleurs d'étoiles



10 min

Corrigé
p. 108

Lycée Victor Hugo, Besançon

On considère les spectres des cinq étoiles suivantes : le Soleil, Deneb, Anilam, Atria et Bételgeuse. Ils présentent chacun un maximum d'émission à la longueur d'onde λ_m , ce qui leur confère une couleur (plutôt rouge pour celles qui présentent un maximum d'émission à grande longueur d'onde, et au contraire bleue pour celles qui présentent un maximum d'émission à courte longueur d'onde).

On mesure les valeurs suivantes :

Étoile	Soleil	Deneb	Alnilam	Atria	Bételgeuse
λ_m (nm)	500	310	110	630	905

- 1 Lesquelles parmi ces étoiles ont leur maximum d'émission dans l'ultra-violet ?
- 2 Laquelle parmi ces étoiles a son maximum d'émission dans l'infrarouge ?
- 3 Dans quel domaine du spectre les autres étoiles ont-elles leur domaine d'émission ?
- 4 Laquelle paraît la plus rouge ?
- 5 Laquelle paraît la plus bleue ?
- 6 Laquelle de ces étoiles a la plus basse température de surface ?
- 7 Laquelle de ces étoiles a la plus haute température de surface ?

5 Température d'étoiles



2 min

Corrigé
p. 108

Lycée Les Fauvettes, Cannes

Classer ces étoiles par ordre de température croissante : Rigel (étoile bleue de la constellation d'Orion), le Soleil (étoile jaune), et Bételgeuse (étoile rouge de la constellation d'Orion).

6 Spectres stellaires



5 min

Corrigé
p. 108

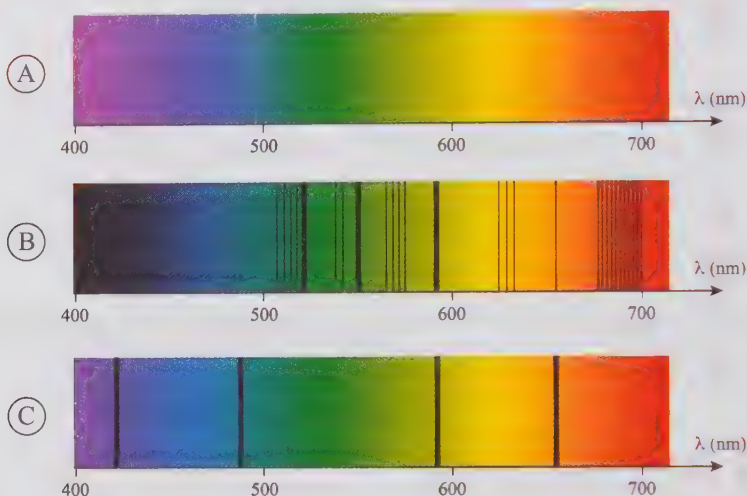
Lycée du Parc des Loges, Versailles

En général, les spectres d'étoiles contiennent des raies d'absorption dues à des *atomes ou ions* présents dans l'atmosphère de l'étoile. Il existe toutefois des exceptions à cette règle générale :

- Certaines étoiles suffisamment « froides » ($T < 3000\text{ °C}$) peuvent contenir des *molécules* dans leur atmosphère, en particulier du monoxyde de titane TiO , qui donne lieu à de très nombreuses raies d'absorption. Les molécules ne peuvent se former que dans les atmosphères d'étoiles « froides ».
- D'autres étoiles particulières, dont la surface est au contraire très chaude ($T \sim 10000 - 30000\text{ °C}$), contiennent des raies d'émission (celles-ci sont émises par un disque qui entoure l'étoile). On les appelle les étoiles de type Be.

Examiner les spectres stellaires des trois étoiles page suivante. L'une d'elles est une étoile froide contenant du monoxyde de titane dans son atmosphère, une autre est une étoile de type solaire, et l'une d'entre elles est une étoile de type Be.

- 1 Indiquer, en justifiant soigneusement, à quel type d'étoile correspond chacun de ces spectres.
- 2 Laquelle de ces étoiles est susceptible d'avoir également des molécules de monoxyde de zirconium ZrO dans son atmosphère ?



7 Température des étoiles



5 min

Corrigé
p. 109

Lycée Janson de Sailly, Paris

Le spectre de la plupart des étoiles est un spectre continu auquel se superposent des raies sombres (raies d'absorption). On peut démontrer que le maximum d'émission du spectre a lieu à une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température de surface des étoiles.

- 1 Expliquer pourquoi une étoile nettement plus chaude que le Soleil apparaît de couleur bleue.
- 2 Expliquer pourquoi une étoile nettement plus froide que le Soleil apparaît de couleur rouge.

8 Calibration de spectre



15 min

Corrigé
p. 110

Lycée du Parc, Lyon

On observe avec un spectrographe le spectre d'une lampe à vapeur de mercure. On obtient des raies aux abscisses suivantes :

x (mm)	2,5	18	73	89,5	107,5
----------	-----	----	----	------	-------

Par ailleurs, on donne les longueurs d'ondes des principales raies du mercure dans le domaine visible, qui sont :

λ (nm)	405	436	546	579	615
----------------	-----	-----	-----	-----	-----

- 1 Les raies détectées lors de l'étalonnage avec la lampe à vapeur de mercure sont-elles des raies d'absorption ou d'émission ? Justifier.
- 2 Sachant que les radiations bleues sont du côté des petites abscisses, identifier à quelle longueur d'onde correspond chacune des raies observées par le spectrographe, et dresser la courbe d'étalonnage de ce dernier.
- 3 On observe le spectre d'une étoile avec le même spectrographe, et l'on détecte des raies en absorption aux abscisses suivantes :

x (mm)	5,0	17	33	43	94,5
----------	-----	----	----	----	------

- (a) Décrire l'allure du spectre observé.
- (b) Quelles sont les longueurs d'onde des raies observées ?
- (c) En déduire, parmi les éléments proposés ci-dessous, ceux qui sont détectés sur ce spectre.

Données :

- Longueurs d'ondes de raies de l'hydrogène (nm) : 410, 434 et 486.
- Longueur d'onde d'une raie du magnésium (nm) : 518.
- Longueur d'onde de raies du fer (nm) : 466, 495.

9 Synthèse de populations

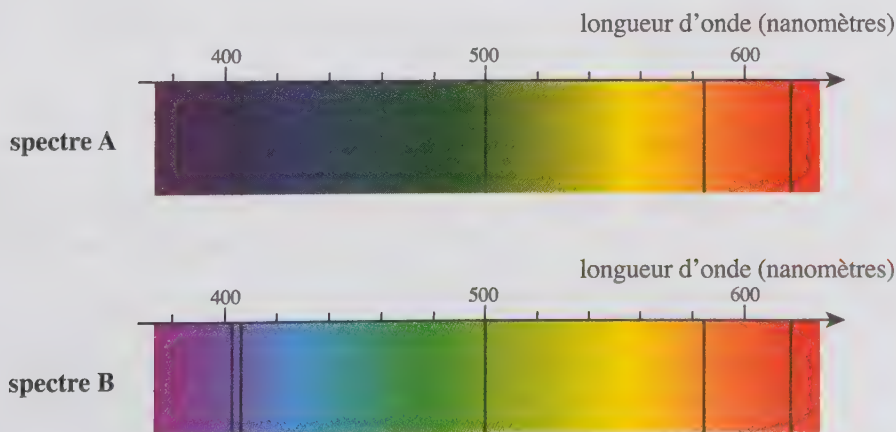
★★

10 min

 ➔ Corrigé
p. 111

Lycée Saint-Louis, Paris

Lorsque l'on observe une autre galaxie que la nôtre par spectroscopie, il est totalement impossible d'observer le spectre d'une seule étoile à la fois. Les spectres obtenus sont les spectres d'un très grand nombre d'étoiles à la fois. Leur étude est riche d'informations sur les propriétés statistiques des étoiles dans les galaxies. On parle de *synthèse de populations*. On considère l'étude d'une galaxie spirale contenant $N = 2 \times 10^{11}$ étoiles. On prend deux spectres de cette galaxie. Le spectre A couvre la région centrale de la galaxie, et représente 0,5 % du nombre total d'étoiles de la galaxie. Le spectre B est pris dans l'un des bras spiraux de la galaxie.



- 1 Combien d'étoiles contribuent au spectre A ?
- 2 Quelle région de la galaxie a une couleur bleutée ? Les bras spiraux ou le centre ?
- 3 Quelle région de la galaxie contient une plus grande proportion d'étoiles chaudes ? Les bras spiraux ou le centre ?

10 Température des étoiles



10 min

Corrigé
p. 112

Lycée Jules-Ferry, Paris

On considère les spectres des 4 étoiles suivantes : le Soleil, Sirius, Rigel et Bételgeuse. Leurs spectres sont des spectres continus, qui contiennent toutes les couleurs des radiations de la lumière visible. Cependant ils présentent chacun un maximum d'émission à une longueur d'onde $\lambda_{\max}$. On mesure les valeurs suivantes :

Étoile	Soleil	Sirius	Rigel	Bételgeuse
$\lambda_{\max}(\text{nm})$	500	330	285	905

La température T de l'étoile est liée à la longueur d'onde du maximum d'émission $\lambda_{\max}$ par la relation suivante :

$$T \times \lambda_{\max} \approx k.$$

Dans cette expression, la température T s'exprime en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$), la longueur d'onde $\lambda_{\max}$ en nanomètre (nm) et k est une constante.

Remarque : Dans les classes scientifiques ultérieures vous verrez une autre unité de température, le kelvin. Lorsque la température est exprimée en kelvin, la relation ci-dessus, alors appelée loi de Wien, n'est plus une relation approchée mais une relation exacte. Pour l'heure nous nous contentons de l'approximation ci-dessus, et exprimons les températures en degrés Celsius.

- 1 Calculer la valeur de la constante k sachant que la température du Soleil est $5\,500\,^{\circ}\text{C}$. Quelle est son unité ?
- 2 Calculer la température de surface des autres étoiles.
- 3 Laquelle paraît la plus rouge ? la plus bleue ?

11 Spectres stellaires

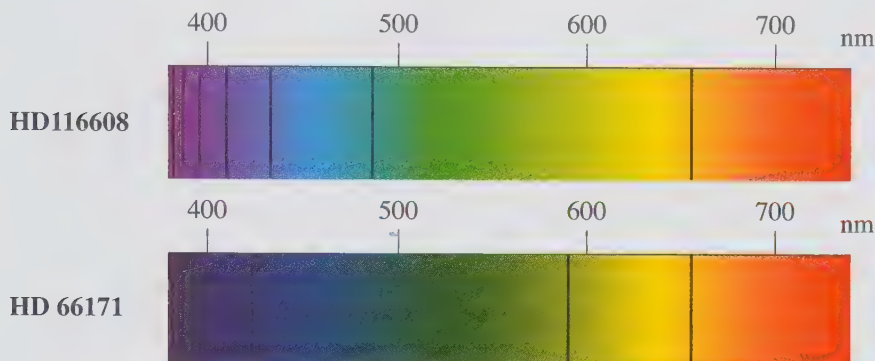
★★★

15 min

 Corrigé
p. 112

Lycée Joffre, Montpellier

On présente sur les figures ci-dessous les spectres de deux étoiles, HD 116608 et HD 66171.



- 1 La formule suivante permet de calculer les longueurs de certaines raies de transition de l'atome d'hydrogène dans le domaine visible du spectre électromagnétique :

$$\lambda = \frac{91,1}{\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}},$$

où n est un entier naturel supérieur ou égal à trois, et où la longueur d'onde obtenue est en nanomètres. Donner dans un tableau les longueurs d'onde pour $n = 3, 4, 5, 6, 7$.

- 2 Peut-on identifier la présence de l'élément hydrogène sur le spectre de ces deux étoiles ?
- 3 L'élément sodium possède une transition électronique donnant une double raie (un doublet) aux longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,0 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 589,6 \text{ nm}$. Sur quelle étoile peut-on identifier la présence de l'élément sodium ? Pourquoi ne voit-on qu'une raie au lieu d'une double raie ?
- 4 Quelle est l'étoile la plus froide ?

12 Analyse du profil spectral du Soleil

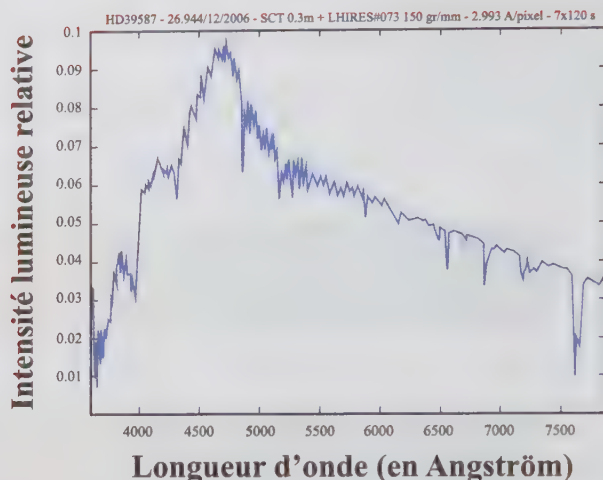
★★★

15 min

 Corrigé
p. 113

Lycée François Couperin, Fontainebleau

Le profil spectral du Soleil est donné page suivante : la courbe représente l'intensité lumineuse relative en fonction de la longueur d'onde des radiations émises par le Soleil. Notons que la longueur d'onde est exprimée ici en Angström ($1 \text{ Angström} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$).



La longueur d'onde du maximum d'intensité lumineuse, notée $\lambda_{\max}$ est liée à la température de surface de l'étoile, notée T par la relation suivante :

$$T \approx \frac{2,8 \times 10^6}{\lambda_{\max}},$$

avec T , la température de surface en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) et $\lambda_{\max}$, la longueur d'onde du maximum d'intensité lumineuse, en nm.

Remarque : cette relation est exacte lorsque la température est exprimée en kelvins (unité qui sera étudiée dans les classes ultérieures). Elle porte alors le nom de loi de Wien.

- 1** Estimer graphiquement la valeur de la longueur d'onde $\lambda_{\max}$, correspondant au maximum d'intensité lumineuse.
- 2** En déduire la température de surface du Soleil.

La classification de Harvard ordonne les étoiles suivant leur température de surface. Leur classement utilise, dans cet ordre, les lettres : O B A F G K M.

La phrase suivante permet de s'en souvenir :

« Oh ! Be A Fine Girl, Kiss Me ! »

La lettre O correspond aux étoiles les plus chaudes (température de surface supérieure à $30\,000\,^{\circ}\text{C}$). Le Soleil est de classe G.

Bételgeuse, étoile de la constellation d'Orion, est une étoile de classe M.

- 3** Comparer sa température à celle du Soleil.
- 4** Ce résultat est-il en accord avec la relation de l'énoncé, sachant que la longueur d'onde du maximum d'intensité lumineuse vaut $9\,050$ Angström pour Bételgeuse ?

1 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 99

- 1 **b**. C'est un spectre d'absorption.
- 2 **a**. Elle contient toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.
- 3 **a**. Vrai.
- 4 **a**. Les raies d'émission ont toutes mêmes longueur d'onde que les raies d'absorption sur le spectre du gaz A.
- 5 **a**. On retrouve les trois raies d'absorption du gaz A. On peut en revanche exclure la présence du gaz B dans le mélange, puisque la plupart des raies du gaz B ne se retrouvent pas dans le spectre proposé.
- 6 **b**. C'est le seul choix possible : les autres spectres présentent des raies qui ne se trouvent pas dans le spectre du mélange.
- 7 **b**. Les raies que l'on trouve en commun sur ces deux spectres sont une paire de raies dans le bleu, vers ~ 450 nm, une raie aux alentours de 570 nm et une raie vers 680 – 690 nm. Cela correspond exactement au spectre d'absorption du gaz B.

2 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 100

- 1 **b**. Elle est de l'ordre du micromètre (le millimètre correspond aux ondes radio millimétriques, et le nanomètre aux rayons X).
- 2 **a**. Les ultraviolets sont en-deçà du violet, donc de longueur d'onde plus courte.
- 3 **b**. Ce rayon laser n'est pas visible (il émet dans l'infrarouge).

3 Domaines de longueurs d'onde

➔ Enoncé
p. 100

Lycée Jean Guehenno, Flers

Par ordre de longueur d'onde *croissante*, les radiations données dans l'énoncé se classent comme suit :

- 1 Radiation ultraviolette.
- 2 Lumière bleue.
- 3 Lumière jaune.
- 4 Radiation infrarouge.

4 Couleurs d'étoiles

➔ Enoncé
p. 100

Lycée Victor Hugo, Besançon

- 1 La limite des ultraviolets proches est 390 nm, donc Deneb, Alnilam ont leur maximum d'émission dans l'ultraviolet.
- 2 La limite des infrarouges proches est 780 nm, donc Bételgeuse a son maximum d'émission dans l'infrarouge.
- 3 Les autres étoiles (dont le Soleil) ont leur maximum d'émission dans le spectre visible.
- 4 Celle qui paraît la plus rouge est celle qui a son maximum d'émission à la plus grande longueur d'onde. Il s'agit de Bételgeuse.
- 5 Celle qui paraît la plus bleue est celle dont le spectre est le plus riche en radiations de courte longueur d'onde, donc elle qui a son maximum d'émission à la plus courte longueur d'onde. Il s'agit d'Alnilam.
- 6 L'étoile qui a la surface la plus froide est celle qui paraît la plus rouge : c'est Bételgeuse.
- 7 L'étoile qui a la surface la plus chaude est celle qui paraît la plus bleue : c'est Alnilam.

5 Température d'étoiles

➔ Enoncé
p. 101

Lycée Les Fauvettes, Cannes

Nous avons vu en cours qu'avec une très bonne approximation le spectre des étoiles pouvait être considéré comme celui d'une source thermique. Plus un corps est chaud, plus son spectre s'enrichit en courtes longueurs d'onde (donc plus la source apparaît bleue).

En voie de conséquence, par ordre de température croissante, les étoiles de l'énoncé se classent ainsi :

- 1 Bételgeuse
- 2 Le Soleil
- 3 Rigel

6 Spectres stellaires

➔ Enoncé
p. 101

Lycée du Parc des Loges, Versailles

- 1 Un seul spectre présente des bandes brillantes, qui sont les raies d'émission. C'est le spectre A, qui correspond donc, selon l'énoncé, au spectre d'une étoile de type Be.
Le spectre B, quant à lui, montre une très grande quantité de raies d'absorption par bandes (c.-à-d. par « groupes »). Ce sont les bandes d'absorption du monoxyde de titane décrite dans l'énoncé. En outre, les radiations de plus courte longueur d'onde (vers le violet) ont pratiquement disparu.

Le spectre B est donc le spectre de l'étoile froide contenant du monoxyde de titane. Par élimination, le spectre C, qui est un spectre stellaire classique montrant un certain nombre de raies d'absorption, est le spectre de l'étoile de type solaire.

- 2** Pour qu'une atmosphère stellaire puisse contenir des molécules, il faut que celle-ci soit suffisamment froide (sans quoi les chocs à haute vitesse entre les entités présentes cassent les liaisons entre atomes dans une molécule).

Il faut, en vertu des indications de l'énoncé, que la température de l'atmosphère stellaire soit inférieure à 3000 K. Seule l'étoile du spectre B est donc susceptible de contenir des molécules de monoxyde de zirconium.

7 Température des étoiles

→ **Énoncé**
p. 102

Lycée Janson de Sailly, Paris

- 1** Le Soleil étant une source thermique de couleur jaune-blanc, les étoiles nettement plus chaudes que lui ont une couleur décalée vers les courtes longueurs d'onde dans le spectre visible. Lorsque leur température est suffisamment grande, elles apparaissent bleues.
- 2** Le raisonnement inverse de la question précédent s'applique : les étoiles plus froides que le Soleil ont une couleur décalée vers les grandes longueurs d'onde du spectre visible par rapport à celui-ci. Lorsque leur température est suffisamment basse, elles apparaissent de couleur rouge.

Notons que ce n'est pas un hasard si la longueur d'onde de l'émission maximum du soleil tombe précisément au milieu de la zone de sensibilité de notre œil (au milieu du spectre de la lumière visible). L'évolution des espèces s'est effectuée de telle manière que l'œil humain (et l'œil de la plupart des espèces) soit le plus sensible aux longueurs d'onde où il est le plus sollicité.

0 Calibration de spectre

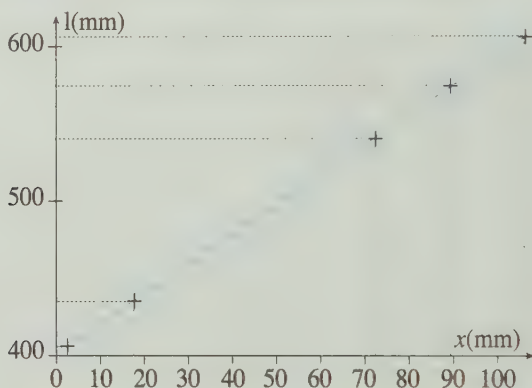
→ Enoncé
p. 102

Lycée du Parc, Lyon

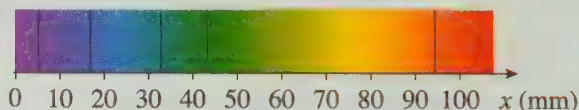
- 1 Une lampe à vapeur de mercure contient un gaz dilué, excité par le passage d'un courant électrique, qui émet à des longueurs d'onde bien précises : c'est un spectre d'émission.
- 2 Les radiations bleues du spectre visible sont du côté des petites longueurs d'onde, et également du côté des petites abscisses d'après l'énoncé. On en déduit donc la correspondance suivante :

x (mm)	2,5	18	73	89,5	107,5
λ (nm)	405	436	546	579	615
couleur	bleu				rouge

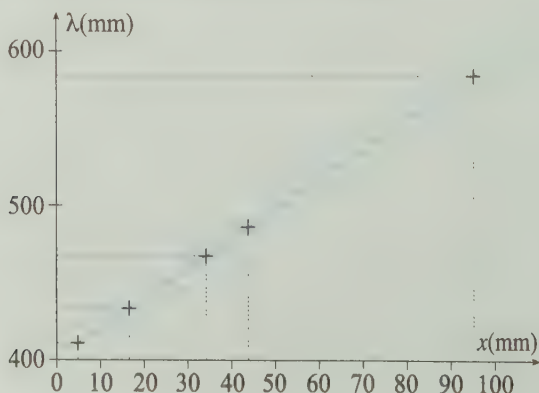
et nous en déduisons la courbe d'étalonnage ci-dessous.



- 3 (a) Le spectre observé a l'allure ci-dessous :



- (b) Pour déduire les longueurs d'onde des raies d'absorption, on utilise la courbe d'étalonnage précédemment établie.



On en déduit, qu'aux erreurs de tracé près, les longueurs d'onde des raies de ce spectre sont :

λ (nm)	410	434	466	486	589
----------------	-----	-----	-----	-----	-----

- (c) Parmi les éléments proposés dans l'énoncé, nous voyons que sont présentes des raies de l'hydrogène (aux trois longueurs d'onde données dans l'énoncé), et une raie du fer (à la longueur d'onde 466 nm). Nous ne retrouvons pas la raie du magnésium, qui n'est donc pas détecté dans l'atmosphère de cette étoile.

Remarque : il existe une raie parmi celles observées qui ne correspond à aucun des éléments suggérés dans l'énoncé : c'est la raie à 589 nm, qui correspond en fait à l'élément sodium.



Synthèse de populations

➔ **Énoncé**
p. 103

Lycée Saint-Louis, Paris

- 1** Le nombre d'étoiles qui contribuent au spectre A est donné par :

$$N' = \frac{0,5}{100} \times 2 \times 10^{11} = 10^9 \text{ étoiles.}$$

Un milliard d'étoiles contribuent au spectre A.

- 2** Nous constatons que le spectre A contient peu de radiations du côté bleu du spectre. Par conséquent la région correspondante (le centre galactique) apparaîtra de couleur plutôt jaune orangée. En revanche le spectre B montre que les bras spiraux émettent beaucoup de radiations du côté bleu du spectre : ces régions apparaissent donc bleutées.

Remarque : C'est une propriété générale des galaxies spirales que l'on peut vérifier sur les nombreuses photographies en couleur de celles-ci que l'on peut trouver sur Internet.

- 3** Lorsque la température d'un corps augmente, son spectre s'enrichit en radiations à courte longueur d'onde (vert, bleu, violet). Les régions de la galaxie qui contiennent plus d'étoiles chaudes, en vertu de la réponse à la question précédente, sont les bras spiraux.

10 Température des étoiles

➔ **Énoncé**
p. 104

Lycée Jules-Ferry, Paris

- 1 L'application numérique de la loi de Wien donne :

$$k = 5\,500 \times 500 \approx 2,75 \times 10^6 \text{ } ^\circ\text{C} \times \text{nm}.$$

- 2 On en déduit la température des autres étoiles en appliquant la formule :

$$T = \frac{k}{\lambda_{\max}}.$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Étoile	Sirius	Rigel	Bételgeuse
Température (K)	8 300	9 700	3 000

- 3 L'étoile qui paraît la plus rouge est la plus froide (c'est aussi celle qui présente un maximum d'émission aux plus grandes longueurs d'ondes) : il s'agit de Bételgeuse.

L'étoile qui paraît la plus bleue est la plus chaude (de plus petite valeur de $\lambda_{\max}$) : il s'agit de Rigel.

11 Spectres stellaires

➔ **Énoncé**
p. 105

Lycée Joffre, Montpellier

- 1 On obtient le tableau suivant :

n	$\lambda(\text{nm})$
3	656
4	486
5	434
6	410
7	397

Compte-tenu de la précision de l'énoncé (la constante multiplicative dans l'expression de λ est donnée avec trois chiffres significatifs), on garde trois chiffres significatifs dans les résultats.

- 2 Sur les deux spectres on peut identifier la raie à $\lambda = 656 \text{ nm}$. En outre, les raies à 486 nm, 434 nm, 410 nm et 397 nm sont visibles sur le spectre de HD116608. L'élément hydrogène est donc présent dans ces deux étoiles.
- 3 Ce doublet est apparent sur le spectre de l'étoile HD66171. On ne voit qu'une raie car les longueurs d'onde des deux raies composant ce doublet sont pratiquement égales, et à l'échelle du spectre de l'énoncé on ne peut pas les distinguer l'une de l'autre.
- 4 L'étoile la plus froide est HD66171. On voit en effet que son rayonnement continu est moins intense aux courtes longueurs d'onde que celui de HD116608. Cette étoile émet préférentiellement à des longueurs d'onde plus grandes que HD116608 (elle est donc « plus rouge ») ; aussi est-elle plus froide.

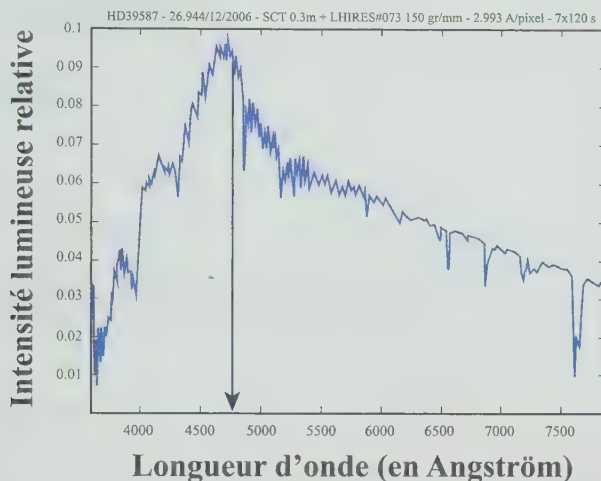
12

Analyse du profil spectral du Soleil

Lycée François Couperin, Fontainebleau

 Enoncé
p. 105

- 1 Par lecture graphique, on détermine $\lambda_{\max}$:



$$\lambda_{\max} = 4\,750 \text{ Angström} = 475 \text{ nm}$$

- 2 L'application de la relation de l'énoncé permet de déterminer la température de surface du Soleil :

$$T \approx \frac{2,8 \times 10^6}{\lambda_{\max}} = \frac{2,8 \times 10^6}{475} \approx 5\,900 \text{ }^\circ\text{C}.$$

- 3 Bételgeuse étant de classe M, est d'après le classement de Harvard, une étoile moins chaude que le Soleil, de classe G.

- 4 Appliquée à Bételgeuse, la relation de l'énoncé donne une température de surface :

$$T \approx \frac{2,8 \times 10^6}{\lambda_{\max}} = \frac{2,8 \times 10^6}{905} \approx 3\,100 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$T(\text{Bételgeuse}) < T(\text{Soleil})$, ce qui est bien en accord avec la question précédente.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Relativité du mouvement

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Vitesse dans un référentiel

Thèmes : la pratique du sport, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Faidherbe, Lille

Un avion à deux hélices (une au milieu de chaque aile) s'élance sur une piste de décollage. Représenter la trajectoire de l'extrémité d'une pale de l'hélice 1 dans :

- 1 le référentiel de l'avion,
- 2 le référentiel terrestre,
- 3 le référentiel de l'hélice 1.
- 4 le référentiel de l'hélice 2.

On admettra que les deux hélices tournent dans le même sens, à la même vitesse, et sont parallèles à tout instant.

Voir corrigé page 118

Cet exercice introduit à la notion de référentiel et de changement de référentiel et va nous permettre de montrer que la valeur d'une vitesse n'a de sens que dans un référentiel donné.

2 Définitions

Définition 1

On appelle trajectoire d'un corps l'ensemble des points par lesquels il passe au cours de son mouvement.

Ainsi la trajectoire d'un enfant sur un manège, par rapport au sol, est un cercle, la trajectoire d'un ascenseur est une droite, etc.

Définition 2

On appelle référentiel un ensemble de points tous immobiles les uns par rapport aux autres.

Exemple : le référentiel « lié au sol » est l'ensemble de tous les points immobiles par rapport au sol, le référentiel « lié à un train » est l'ensemble de tous les points immobiles par rapport au train, etc.

Définition 3

Le référentiel lié au sol est appelé référentiel terrestre ou parfois référentiel du laboratoire.

La plupart des observations de la vie quotidienne se font dans le référentiel terrestre. C'est dans ce référentiel que l'on donne usuellement les vitesses des véhicules terrestres.

Définition 4

Le référentiel géocentrique est un référentiel comprenant le centre de la Terre, et ne participant pas au mouvement de rotation terrestre, au contraire du référentiel terrestre.

Un observateur immobile par rapport au sol décrit une trajectoire circulaire dans le référentiel géocentrique (sauf un observateur situé à un pôle, qui est immobile dans le référentiel géocentrique). Si l'on imagine un repère ayant pour origine le centre de la Terre, et dont les axes pointent en direction d'étoiles lointaines, le référentiel géocentrique est l'ensemble des points immobiles par rapport à ce repère.

Définition 5

Le référentiel héliocentrique est un référentiel comprenant le centre du Soleil, et ne participant pas au mouvement de rotation du Soleil sur lui-même.

Si l'on imagine un repère ayant pour origine le centre du Soleil, et dont les axes pointent en direction d'étoiles lointaines, le référentiel géocentrique est l'ensemble des points immobiles par rapport à ce repère.

Le référentiel géocentrique est utile pour décrire les mouvements des satellites, tandis que le référentiel héliocentrique est utile pour décrire les mouvements des planètes et autres corps (astéroïdes, comètes) du Système Solaire.

3 Vitesse dans un référentiel

3.1 Exemple

Montrons que la trajectoire d'un corps dépend de l'observateur. Imaginons qu'une personne laisse tomber une pomme du haut du mât d'un bateau en mouvement. Un observateur A situé sur le pont verra la pomme décrire simplement une droite verticale. En revanche, un observateur B immobile sur une barque à la surface de l'océan verra la pomme décrire une toute autre trajectoire.

La trajectoire que voit l'observateur B est appelée une parabole.

On voit dès lors l'importance de spécifier *par rapport à quoi* on étudie un mouvement. C'est la raison pour laquelle, dans les exemples de la section précédente, nous avons bien précisé « par rapport au sol ».

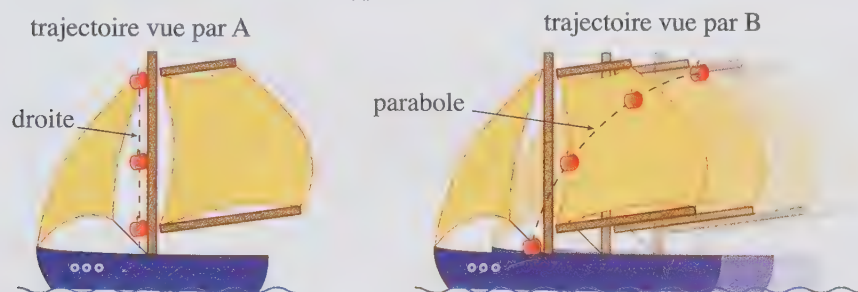


Figure 5.1 – Selon l'observateur, la trajectoire est soit une droite, soit une parabole. Le bateau de gauche est immobile dans le référentiel de l'observateur, tandis que celui de droite se dirige vers la gauche dans le référentiel de l'observateur.

3.2 Vitesse d'un corps

La vitesse d'un corps dans un référentiel donné est la distance parcourue par unité de temps dans ce référentiel.

Considérons un corps animé d'un mouvement de translation rectiligne. Entre deux instants t_1 et t_2 il a parcouru une distance d .

Définition 6

La vitesse moyenne V du corps entre les instants t_1 et t_2 est donnée par :

$$V = \frac{d}{t_2 - t_1}$$

Si l'instant t_2 est « très proche » de l'instant t_1 , ces deux instants sont presque confondus, et l'on parle alors de vitesse instantanée.

À RETENIR

La vitesse instantanée est la vitesse à un instant donné.

Définition 7

Lorsque la vitesse instantanée ne varie pas au cours du temps, on parle de mouvement uniforme.

Pour étudier le mouvement d'un corps, on peut avoir recours à la technique de chronophotographie. Elle consiste à prendre une séquence de photographies à intervalle fixe, et de les présenter superposées soit sur la même image, soit sur une séquence d'images. Nous reverrons cette technique en exercice.

Exemple : la vitesse du passager se déplaçant dans le train de la figure ci-dessous est 2 km.h^{-1} dans le référentiel du train ; la vitesse du train est de 160 km.h^{-1} dans le référentiel terrestre. Dans ce référentiel, le passager a une vitesse de 162 km.h^{-1} .

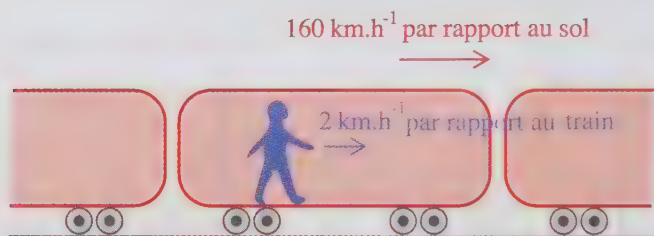


Figure 5.2 – La vitesse d'un corps dépend du référentiel d'étude.

Notion de mouvement rectiligne uniforme

Le mouvement d'un corps dans un référentiel donné est dit « rectiligne et uniforme » si sa trajectoire est une droite et si sa vitesse est constante au cours du temps.

Exemple : le mouvement du train de l'exemple précédent est rectiligne et uniforme dans le référentiel terrestre si la voie ferrée est droite et s'il n'accélère pas et ne freine pas.

Solution de l'exercice type

Lycée Faidherbe, Lille

- 1 Dans le référentiel de l'avion, l'extrémité de la pale de l'hélice décrit un cercle.



Figure 5.3 – Trajectoire de l'extrémité de la pale dans le référentiel lié à l'avion.

Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Faidherbe, Lille

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1. Dans le référentiel terrestre (celui de la piste de décollage), la trajectoire de l'extrémité de la pale décrit un mouvement combiné de rotation et de translation. C'est un mouvement dit hélicoïdal, ou en tire-bouchon. Celui-ci est de plus en plus ouvert vers l'extrémité de la piste où l'avion décolle, puisque l'avion est de plus en plus rapide.

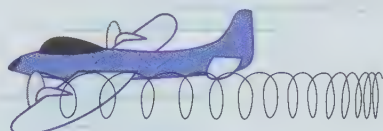


Figure 5.4 – Trajectoire de l'extrémité de la pale dans le référentiel lié à la piste.

2. Dans le référentiel de l'hélice 1, l'extrémité de la pale est bien sûr immobile, à tout instant. Sa trajectoire y est donc un point P .



Figure 5.5 – La trajectoire de l'extrémité de la pale dans son propre référentiel est un point.



Figure 5.6 – Le cercle d'en bas est la trajectoire du centre de l'hélice, et celui d'en haut la trajectoire de l'extrémité de la pale de l'hélice.

On commence par déterminer la trajectoire du centre de l'hélice 1 dans le référentiel lié à l'hélice 2. C'est un cercle dont le rayon est la distance séparant les axes des deux hélices. On utilise ensuite le fait que les deux hélices tournent à la même vitesse et sont parallèles pour déduire que la trajectoire d'une extrémité de la pale de l'hélice 1 est le cercle précédemment obtenu translaté de la longueur d'une pale. Notons qu'il n'était pas indispensable de spécifier que les pales étaient parallèles. Il suffit de savoir qu'elles tournent à la même vitesse pour pouvoir conclure qu'elles gardent toujours la même orientation l'une par rapport à l'autre. Dans ce cas plus général, la même conclusion s'applique.

Voir énoncé page 115

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 129

- 1 On considère une roue de voiture roulant (sans « déraiper ») sur une route plate. Quel point de la roue a la plus grande vitesse par rapport à la chaussée ?
 - a La partie inférieure du pneu (en contact avec la chaussée)
 - b La partie supérieure du pneu
- 2 Un TGV circule sur une ligne à très grande vitesse. Il croise un escargot se trouvant juste à côté des rails. Quelle est l'ordre de grandeur de la vitesse de l'escargot par rapport au TGV ?
 - a 300 km.h^{-1}
 - b presque 0 km.h^{-1}
- 3 Chercher l'intrus :
 - a Un train sur une voie rectiligne
 - b Une marche d'escalator du métro
 - c Une nacelle de grande roue
- 4 Deux trains se croisent. La vitesse du premier est 250 km.h^{-1} , la vitesse du second est 163 km.h^{-1} . Dans la phrase précédente, l'expression vitesse signifie :
 - a Vitesse d'un train par rapport à l'autre.
 - b Vitesse par rapport à la voie ferrée .
- 5 Autre question de vocabulaire en rapport avec la question précédente : l'expression « vitesse d'un train par rapport à l'autre » et l'expression « vitesse relative des deux trains » sont-elles équivalentes ?
 - a oui
 - b non
- 6 Identifier la ou les expression(s) équivalente(s) à l'affirmation : « la moto M est animée d'une vitesse V par rapport à la route ».
 - a M a une vitesse V dans le référentiel terrestre.
 - b La route a une vitesse V dans le référentiel attaché à M.
 - c M est immobile.
 - d M n'est pas immobile par rapport à la route.
- 7 Sans utiliser la calculatrice ni poser les calculs, trier les véhicules suivants par ordre de vitesse moyenne croissante.
 - a Une voiture qui parcourt une distance de 35 km en une heure.
 - b Un camion qui parcourt une distance de 40 km en une heure et demie.
 - c Une voiture qui parcourt une distance de 20 km en une demi-heure.
 - d Un cycliste qui parcourt une distance de 1 km en deux minutes.

2 QCM Référentiels

5 min

Corrigé
p. 129

- 1** Le Soleil décrit une trajectoire circulaire :
 - a** dans le référentiel terrestre ;
 - b** dans le référentiel héliocentrique.
- 2** Un satellite géostationnaire est un satellite qui reste toujours au-dessus du même point de la surface terrestre (d'où son nom). Un satellite géostationnaire décrit une trajectoire circulaire :
 - a** dans le référentiel terrestre ;
 - b** dans le référentiel géocentrique.
- 3** Dans le référentiel géocentrique, le Soleil :
 - a** décrit une trajectoire circulaire en 24 heures ;
 - b** est au repos ;
 - c** décrit une trajectoire circulaire en 365 jours.

3 Référentiels

5 min

Corrigé
p. 129**Lycée Lavoisier, Paris**

- 1** Rappeler la définition d'un référentiel.
- 2** Éva, au volant de sa voiture, démarre. Romain, qui conduit une autre voiture, la dépasse. Dans quel référentiel chacune des affirmations suivantes d'Eva sont-elles correctes ?
 - (a)** « Je suis immobile »
 - (b)** « J'avance »
 - (c)** « Je recule »

4 Vitesse d'un nageur

5 min

Corrigé
p. 130**Lycée Watteau, Valenciennes**

- 1** Un champion de natation effectue un 100 mètres nage libre en 48 secondes.
 - (a)** Quelle est sa vitesse moyenne en mètres par seconde ?
 - (b)** Quelle est sa vitesse moyenne en kilomètres par heure ?
- 2** Une caméra montée sur des rails suit le nageur de manière à ce qu'il apparaisse en permanence au centre de l'image.
 - (a)** Quelle est la vitesse du nageur dans le référentiel de la caméra ?
 - (b)** Quelle est la vitesse des spectateurs dans le référentiel de la caméra ?

5

Composition des mouvements



5 min

Corrigé
p. 130

Lycée Balzac, Tours

On considère la situation représentée sur la figure ci-dessous. Les bars ambulants sont tous les deux animés, par rapport à leurs wagons respectifs, d'une vitesse $v = 1 \text{ km.h}^{-1}$. Les deux voies sont parallèles.

Justifier ou réfuter les affirmations suivantes :

- 1 V_2 est immobile par rapport à T_2 .
- 2 V est en mouvement par rapport à T_2 .
- 3 V_1 est en mouvement par rapport à T_1 .
- 4 B_1 est en mouvement par rapport à B_2 .

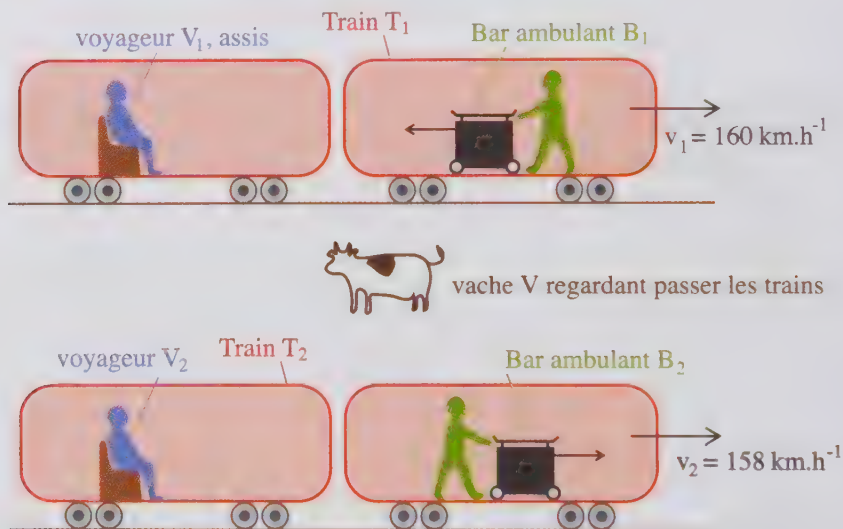


Figure 5.7 – Les différents systèmes représentés sont en mouvement de translation les uns par rapport aux autres.

6

Course à pied

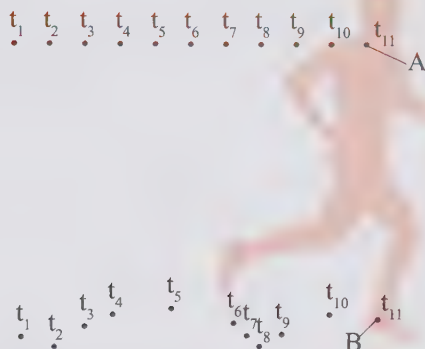


15 min

Corrigé
p. 131

Lycée Paul Sabatier, Carcassonne

On réalise la chronophotographie d'un coureur à pied, en prenant une image toutes les 100 ms. Des repères lumineux A et B situés respectivement sur le col du coureur et sur sa chaussure droite donnent lieu à l'image ci-dessous, réalisée à l'échelle 1/30^e (un millimètre sur la figure correspond à 30 mm sur le système étudié).



- 1 Lequel des deux repères lumineux A ou B atteint la plus grande vitesse instantanée dans le référentiel terrestre ?
- 2 Quelle est la vitesse instantanée du point B à la date t_5 ? On exprimera celle-ci en kilomètres par heure.
- 3 À quel(s) instant(s) la chaussure droite du coureur est-elle en contact avec le sol ?
- 4 De la question précédente déduire la vitesse moyenne du coureur sur une foulée.

7 Fête foraine



15 min

 ➔ Corrigé
p. 132

Lycée Hoche, Versailles

À une fête foraine, deux enfants, Valentine et Florian, sont sur un manège, et se trouvent dans deux nacelles différentes. On se place dans le référentiel terrestre. Valentine décrit un cercle de rayon $R = 5$ m, alors que Florian décrit un cercle de rayon $R = 3$ m. Le manège effectue au total 20 tours, qui durent 5 minutes.

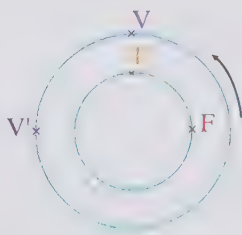


Figure 5.8 – Vue du dessus des trajectoires des deux enfants.

- 1 Calculer les vitesses moyennes respectives de Valentine et Florian.
- 2 Sur la figure 5.8, représenter les vecteurs-vitesse de Valentine aux positions V et V', et de Florian aux positions F et F'. Ce sont des vecteurs dont la norme est égale à la vitesse, de direction tangente au mouvement, et dont le sens est celui du mouvement.
On adoptera pour échelle 1 cm pour 1 m.s^{-1} .

8 Précision d'un chronométrage

★★

15 min

Corrigé
p. 133

Lycée Paul Claudel, Paris

- 1 Un champion du 200 mètres court cette distance en 20,12 secondes. Quelle est sa vitesse moyenne en mètres par seconde ?
- 2 Convertir cette vitesse en kilomètres par heure.
- 3 Quelle est la distance parcourue par le coureur pendant un centième de seconde (précision du chronométrage) ?
- 4 L'athlète est filmé par une caméra standard, qui prend 25 images par seconde. On passe le film au ralenti. Quelle distance parcourt l'athlète entre deux images successives ? Le film au ralenti paraît-il fluide ? Comment pourrait-on remédier à ce problème ?

9 Arrivée de coureurs

★★

10 min

Corrigé
p. 133

Lycée Saint-Louis, Paris

À l'arrivée d'une course de 400 mètres, le gagnant réalise un temps de 44,12 s. Le dernier coureur réalise, lui, un temps de 45,91 s. Lorsque le gagnant franchit la ligne d'arrivée, à quelle distance le dernier coureur se trouve-il derrière lui ? On supposera la vitesse de ce dernier constante tout au long de son parcours.

10 Mobile sur coussin d'air

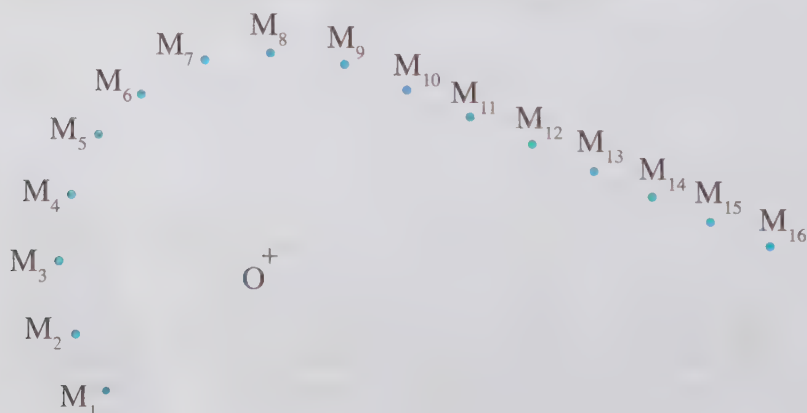
★★

20 min

Corrigé
p. 134

Lycée Victor Duruy, Paris

Sur une table horizontale, un mobile sur coussin d'air S est relié à un point fixe O par un fil inextensible. On lance le mobile et on enregistre, à intervalles de temps égaux $\tau = 10$ ms, les positions successives M_i du point M situé au centre du mobile. La première partie du mouvement s'effectue fil tendu, puis celui-ci se casse. L'enregistrement obtenu est reproduit ci-dessous.



- 1 On constate au vu de l'enregistrement que le mouvement du point M peut se décomposer en deux phases distinctes.
 - (a) Indiquer sous la forme $M_i M_j$ les deux parties correspondantes à ces deux phases.
 - (b) Pour chacune d'elle, donner la nature du mouvement.
- 2 Évaluer les vitesses du mobile aux points M_5 et M_{15} . Les représenter sur l'enregistrement. On prendra comme échelle de vitesse : 1 cm représente $0,4 \text{ m.s}^{-1}$.

11 Trajet autoroutier

★★

15 min

Corrigé
p. 135

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Une voiture circule sur une autoroute pour aller d'une ville A à une ville B, distante de 40 km. Sur les 20 premiers kilomètres, elle roule à 120 km.h^{-1} ; en revanche, les 20 derniers kilomètres sont en travaux et la voiture ne circule plus qu'à 40 km.h^{-1} .

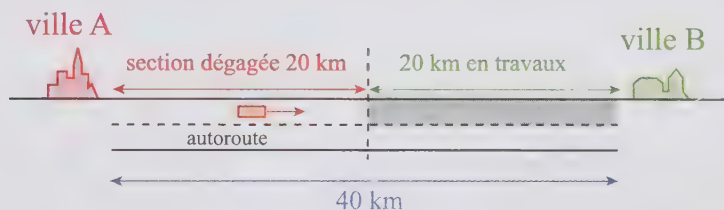


Figure 5.9 – Schéma de l'itinéraire de la voiture.

- 1 Combien de temps met-elle pour effectuer le trajet ?
- 2 Quelle a été sa vitesse moyenne sur l'ensemble du trajet ?

12 Au gré du courant

★★★

10 min

Corrigé
p. 136

Lycée Léonard Limosin, Limoges

Un explorateur descend un fleuve à l'aide d'un canot à moteur. La vitesse du courant est $V_c = 6 \text{ km.h}^{-1}$, et le moteur communique au bateau une vitesse $V_b = 15 \text{ km.h}^{-1}$ par rapport à l'eau.

À un moment donné, le caisson hermétique contenant les vivres tombe à l'eau et dérive au gré du courant. L'explorateur ne s'en rend compte que cinq minutes plus tard.

- 1 À quelle distance se trouve-t-il alors du caisson des vivres ?
- 2 Il fait demi-tour et utilise son moteur pour remonter le courant. Combien de temps va-t-il mettre pour revenir au niveau du caisson ?

13 La mouche et le coche

★★★

20 min

Corrigé
p. 136

Lycée Camille Guérin, Poitiers

Deux coches partent à midi, l'un d'une ville A vers la ville B, l'autre de la ville B vers la ville A. La distance entre les deux villes est $d(A, B) = 75 \text{ km}$. Les deux coches vont à la vitesse $v = 25 \text{ km.h}^{-1}$ dans le référentiel terrestre.

- 1 À quelle heure les deux coches se croisent-ils ?
- 2 Une mouche posée sur l'un des chevaux s'envole lorsque le coche situé en A démarre (donc à midi) et vole vers l'autre coche ; lorsqu'elle l'atteint, elle fait demi-tour et revient vers le premier, puis refait demi-tour, et ainsi de suite ... Elle vole à la vitesse $v' = 50 \text{ km.h}^{-1}$. Quelle distance a-t-elle parcourue lorsque les deux coches se croisent ?

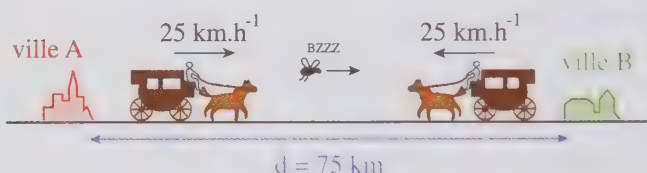


Figure 5.10 – La mouche vole à vitesse constante entre les deux coches.

14 Course automobile

★★★

15 min

Corrigé
p. 137

Lycée Henri IV, Paris

À l'arrivée d'une course de voitures, deux pilotes, A et B, sont en tête. A est à 701 mètres de la ligne d'arrivée, et roule à la vitesse $v_A = 272 \text{ km.h}^{-1}$.

B est pour sa part à 50 mètres derrière A, et roule à la vitesse $v_B = 285 \text{ km.h}^{-1}$. On suppose que les deux pilotes maintiennent leur vitesse constante jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée.

- 1 Quel pilote gagne la course, et quelle durée sépare leurs franchissements respectifs de la ligne d'arrivée ?
- 2 Quelle devrait être la vitesse de A pour que les deux pilotes arrivent ex-æquo ?

15 Roue de vélo

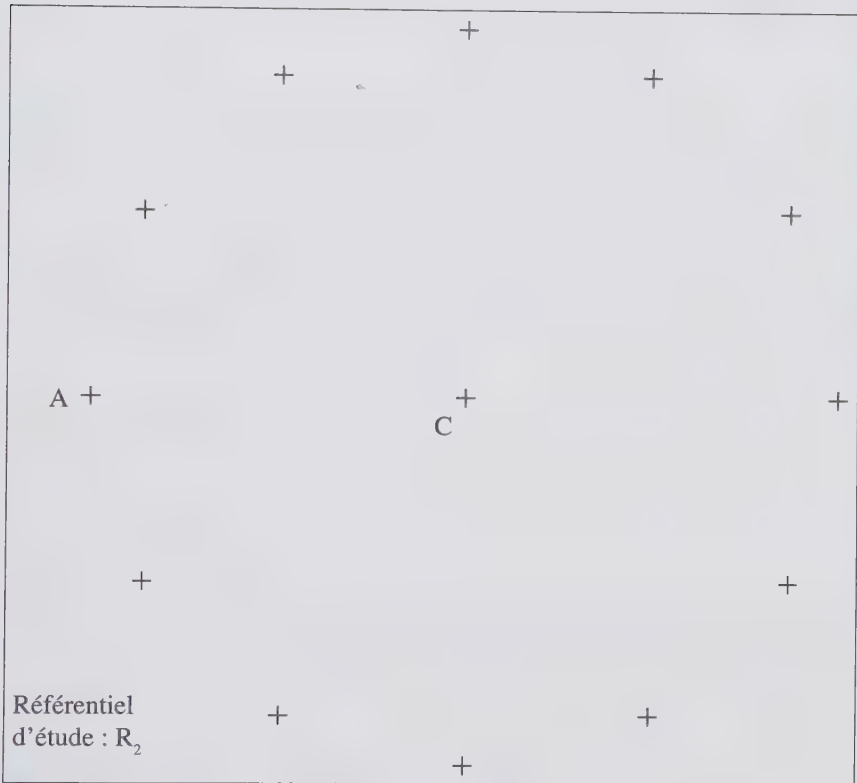
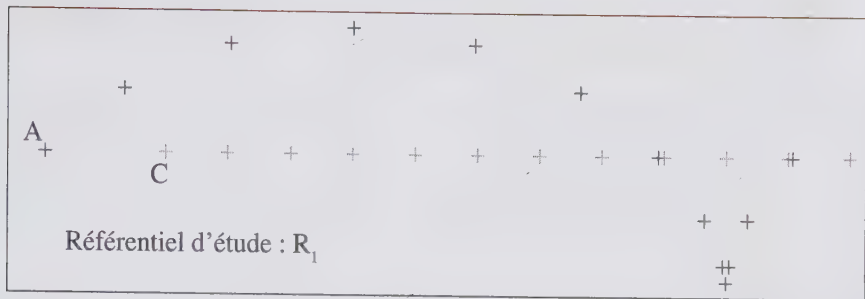
★★★

20 min

Corrigé
p. 138

Lycée Ampère, Lyon

Un cycliste roule en ligne droite sur une route horizontale, à vitesse constante. On étudie les trajectoires de deux points particuliers de l'une de ses roues : le centre C, et un point A situé sur le pneu. Ces trajectoires sont étudiées dans deux référentiels différents, R_1 et R_2 . On donne ci-dessous les enregistrements correspondants.



- 1 Compléter au crayon les trajectoires des différents points.
- 2 Comment appelle-t-on la technique d'enregistrement utilisée ?
- 3 Quels sont respectivement les référentiels R_1 et R_2 ? On justifiera soigneusement.
- 4 Décrire et qualifier le mouvement des points A et C dans les deux référentiels, en justifiant.
- 5 Lequel des deux points A et C atteint la plus grande vitesse dans le référentiel terrestre ?
- 6 Lequel des deux points A et C atteint la plus petite vitesse dans le référentiel terrestre ?

16 Train Grande Vitesse

★★★

20 min

Corrigé
p. 139**Lycée Jeanne d'Albret, Saint Germain en Laye**

Un avion de tourisme (nommé A) vole au-dessus d'une ligne de TGV à la vitesse $v_A = 380 \text{ km.h}^{-1}$.

Le TGV (nommé T) roule dans le même sens à la vitesse $v_T = 300 \text{ km.h}^{-1}$.

- 1** (a) Dans quel référentiel les vitesses ont-elles été mesurées ?
(b) Les convertir dans l'unité du Système International.
- 2** À la date $t = 0$, l'avion est au-dessus du TGV.
 - (a) Quelle distance d_A l'avion aura-t-il parcouru à la date $t = 1 \text{ min}$, dans le référentiel terrestre ?
 - (b) Quelle distance d_T le TGV aura-t-il parcouru à la même date ?
 - (c) Faire un schéma simple montrant sur un axe les positions respectives de l'avion et du TGV à la date t , ainsi que la position de départ.
 - (d) En exploitant le schéma de la question précédente, déterminer la vitesse v'_A de l'avion dans le référentiel du TGV. On exprimera cette vitesse dans les unités du Système International, puis en km.h^{-1} .

1 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 120

- 1 La partie supérieure du pneu (la partie du pneu en contact avec la chaussée est *immobile* par rapport à la route si la voiture ne dérape pas !).
- 2 L'escargot voyage à 300 km.h^{-1} par rapport au TGV.
- 3 La nacelle de grande roue est le seul objet n'ayant pas une trajectoire rectiligne.
- 4 Il s'agit de la vitesse « au compteur » de chacun de ces trains, c'est-à-dire de leur vitesse par rapport à la voie ferrée (dans le référentiel de la voie ferrée).
- 5 Oui, ces deux expressions sont équivalentes.
- 6 Les assertions **a** et **b** sont équivalentes à la phrase de l'énoncé. Il est à noter que l'assertion **c** n'a pas de sens (*immobile par rapport à quoi ?*) et que l'assertion **d** est vraie mais pas *équivalente* à la phrase de l'énoncé, puisqu'elle ne mentionne pas la vitesse de M.
- 7 Par ordre de vitesse croissante : **b**, **d**, **a** et **c**.

2 QCM Référentiels

➔ Enoncé
p. 121

- 1 **a**. Cela correspond au mouvement diurne du Soleil par rapport au sol.
- 2 **b**. Par définition il est au repos dans le référentiel terrestre.
- 3 **c**. Un observateur au centre de la Terre et ne participant pas à son mouvement de rotation verrait le Soleil décrire une trajectoire circulaire de même rayon que celle de l'orbite de la Terre autour du Soleil dans le référentiel héliocentrique.

3 Référentiels

➔ Enoncé
p. 121

Lycée Lavoisier, Paris

- 1 Un référentiel est un objet pris comme référence pour étudier le mouvement d'un système.
- 2 (a) Eva peut affirmer « Je suis immobile » dans le référentiel de sa voiture.
(b) L'affirmation « j'avance » est correcte dans le référentiel de la route.
(c) Puisque la voiture de Romain la dépasse, elle peut affirmer « je recule » dans le référentiel lié à la voiture de Romain.

4 Vitesse d'un nageur

Enoncé
p. 121

Lycée Watteau, Valenciennes

- 1 (a) La distance parcourue est $d = 100$ m, pendant la durée $t = 48$ s. La vitesse moyenne du nageur est donc :

$$v = \frac{d}{t} = \frac{100}{48} = 2,1 \text{ m.s}^{-1}.$$

- (b) Nous convertissons à présent cette vitesse en kilomètres par heure :
- $$v = 2,1 \times 3,6 = 7,5 \text{ km.h}^{-1}.$$

MÉTHODE

Pour convertir des mètres par seconde en kilomètres par heure, on multiplie par 3,6.

- 2 (a) Le mouvement de la caméra dans le référentiel de la piscine est conçu précisément pour que le nageur apparaisse fixe. Le nageur a donc une vitesse nulle dans le référentiel de la caméra.
- (b) La vitesse de la caméra par rapport à la piscine (ou par rapport aux spectateurs) est $7,5 \text{ km.h}^{-1}$, donc la vitesse des spectateurs dans le référentiel de la caméra est aussi $7,5 \text{ km.h}^{-1}$.

5 Composition des mouvements

Enoncé
p. 122

Lycée Balzac, Tours

- 1 Vrai. Dans le référentiel du train, la vitesse du voyageur V_2 est nulle.
- 2 Vrai. En effet, le train T_2 est en mouvement dans le référentiel lié à la Terre (c'est-à-dire est en mouvement dans le référentiel lié au paysage), donc le train T_2 est en mouvement par rapport à la vache V . Réciproquement, la vache V est en mouvement par rapport au train T_2 .
- 3 Faux. De la même manière que V_2 est immobile par rapport à T_2 , V_1 est immobile par rapport à T_1 .
- 4 Faux. Pour s'en convaincre, calculons les vitesses respectives des bars ambulants B_1 et B_2 dans le référentiel lié à la Terre.
- Le bar ambulant B_1 va vers la gauche, alors que le train dans lequel il se trouve va vers la droite, donc sa vitesse par rapport au paysage est :

$$v'_1 = v_1 - v = 160 - 1 = 159 \text{ km.h}^{-1}.$$

En revanche, le bar ambulant B_2 va vers la droite, alors que le train dans lequel il se trouve va vers la droite, donc sa vitesse par rapport au paysage est :

$$v'_2 = v_2 + v = 158 + 1 = 159 \text{ km.h}^{-1}.$$

Les vitesses v'_1 et v'_2 sont égales. Comme les voies sont parallèles, les vecteurs-vitesse sont égaux, d'où l'on déduit que les deux bars ambulants sont immobiles l'un par rapport à l'autre.

6 Course à pied

→ Enoncé
p. 122

Lycée Paul Sabatier, Carcassonne

- 1 On constate que la plus grande distance d'un point au suivant est atteinte sur l'enregistrement du point B, entre les dates t_4 et t_5 , ainsi que t_5 et t_6 . Par conséquent, c'est le point B qui atteint la plus grande vitesse instantanée dans le référentiel terrestre.
- 2 On mesure sur la figure la distance de l'image du point B à la date t_4 à l'image du point B à la date t_6 . On trouve $d = 1,5$ cm. On en déduit une estimation de la vitesse instantanée v_5 à la date intermédiaire t_5 :

$$v_5 \approx \frac{d}{t_6 - t_4} \approx \frac{1,5 \times 30 \times 0,01}{0,2} = 2,3 \text{ m.s}^{-1}.$$

Le facteur 30 dans le numérateur ci-dessus correspond au changement d'échelle, et le facteur 0,01 convertit les centimètres en mètres. Les instants t_4 et t_6 sont séparés par deux périodes de la chronophotographie, soit 0,2 s, que l'on reporte au dénominateur. L'estimation obtenue est à présent convertie en kilomètres par heure :

$$v_5 \approx 2,3 \times 3,6 \approx 8,3 \text{ km.h}^{-1}.$$

Compte-tenu de la précision de lecture de la figure, garder deux chiffres significatifs est un maximum.

- 3 Lorsque la chaussure est en contact avec le sol, sa vitesse instantanée dans le référentiel du sol (référentiel terrestre) est pratiquement nulle. La chaussure est donc en contact avec le sol aux instants où la distance entre deux points successifs de la chronophotographie est minimale. Ceci a lieu aux instants t_2 et t_8 .

 MÉTHODE

Bien entendu, ces dates de contact correspondent également aux instants où l'altitude du point B est minimale.

- 4 La distance séparant les images du point B aux dates t_2 et t_8 , que l'on peut mesurer sur la figure, est $D \approx 25$ mm. On en déduit, comme précédemment, la vitesse moyenne du coureur entre les dates t_8 et t_2 :

$$v = \frac{D}{t_8 - t_2} \approx \frac{25 \times 30 \times 10^{-3}}{0,6} = 1,25 \text{ m.s}^{-1}.$$

Comme précédemment, le facteur 30 correspond au changement d'échelle, et le facteur 10^{-3} à la conversion des millimètres en mètres. On convertit cette vitesse en kilomètres par heure :

$$v \approx 1,25 \times 3,6 \approx 4,5 \text{ km.h}^{-1}.$$

7 Fête foraine

Enoncé
p. 123

Lycée Hoche, Versailles

- 1 Le périmètre d'un cercle de rayon R est égal à $2\pi R$, donc par tour chaque enfant parcourt la distance $2\pi R$, soit au total la distance $20 \times 2\pi R = 40\pi R$, puisque le manège effectue vingt tours. Ces vingt tours durent au total un temps $T = 5 \text{ min} = 5 \times 60 = 300 \text{ s}$. La vitesse d'un enfant s'obtient simplement en utilisant la relation :

$$\text{vitesse} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}},$$

soit :

$$v = \frac{40\pi R}{T}.$$

L'application numérique pour Valentine donne :

$$v = \frac{40\pi \times 5}{300} \approx 2,1 \text{ m.s}^{-1}$$

et l'application numérique pour Florian donne :

$$v = \frac{40\pi \times 3}{300} \approx 1,3 \text{ m.s}^{-1}.$$

- 2 Le vecteur-vitesse est tangent à la trajectoire. Les vecteurs représentatifs des vecteurs-vitesse de Valentine, d'après l'échelle donnée dans l'énoncé, ont pour longueur 2,1 cm, et ceux représentatifs des vecteurs-vitesse de Florian ont pour longueur 1,3 cm.

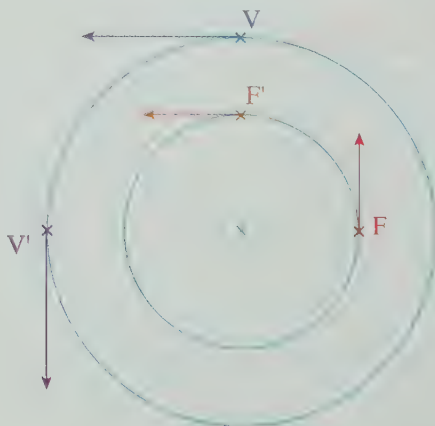


Figure 5.11 – Vecteurs vitesse des deux enfants à différentes positions.



Précision d'un chronométrage

➔ **Énoncé**
p. 124

Lycée Paul Claudel, Paris

- 1** La vitesse du coureur est donnée par :

$$v = \frac{l}{t},$$

où $l = 200$ mètres est la distance parcourue, et $t = 20,12$ s est le temps mis pour parcourir cette distance. On notera que la notation pour la distance est celle du langage commun, aussi ne transcrit-elle pas la précision avec laquelle cette distance est connue (bien inférieure au mètre).

Application numérique :

$$v = \frac{200}{20,12} = 9,940 \text{ m.s}^{-1}.$$

Nous gardons quatre chiffres significatifs pour ce résultat, car c'est la précision avec laquelle est donné le temps du coureur.

- 2** Cette vitesse, exprimée en kilomètres par heure, vaut :

$$v = 9,940 \times 3,6 = 35,78 \text{ km.h}^{-1}.$$

Nous gardons là-encore quatre chiffres significatifs.

- 3** Soit $\tau = 0,01$ s la précision du chronométrage. La distance d parcourue par l'athlète pendant cette durée est :

$$d = \tau \times v = 0,01 \times 9,940 = 0,0994 \text{ m} = 9,94 \text{ cm}.$$

- 4** Le laps de temps qui sépare deux images est :

$$t' = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ s}.$$

Pendant ce laps de temps, l'athlète parcourt une distance d' donnée par :

$$d' = t' \times v = 0,04 \times 9,940 = 0,3976 \text{ m} \approx 40 \text{ cm}.$$

L'athlète parcourt donc une distance considérable (environ égale à l'épaisseur de son corps) entre deux images successives. Le film au ralenti est donc loin de paraître fluide, et l'on a plus l'impression que l'athlète « saute » d'une position à l'autre entre deux images. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire de disposer d'une caméra qui prend des images à un rythme beaucoup plus élevé (au moins 100 images par seconde).



Arrivée de coureurs

➔ **Énoncé**
p. 124

Lycée Saint-Louis, Paris

On appelle $t_1 = 44,12$ s le temps réalisé par le premier coureur, et $t_2 = 47,91$ s le temps réalisé par le dernier coureur. La vitesse de ce dernier, supposé constante sur son parcours, est donnée par :

$$v_2 = \frac{L}{t_2},$$

où $L = 400$ m est la longueur du parcours. Au bout du temps t_1 , il a donc parcouru une distance :

$$D = v_2 \times t_1 = L \frac{t_1}{t_2}$$

et se trouve donc à une distance d de la ligne d'arrivée (et donc du premier coureur, donné par :

$$d = L - D = L - L \frac{t_1}{t_2} = L \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right).$$

Application numérique :

$$d = 400 \times \left(1 - \frac{44,12}{45,91} \right) = 15,60 \text{ m.}$$

Le dernier coureur se trouve à une distance de 15,60 m du premier lorsque ce dernier franchit la ligne d'arrivée.

10 Mobile sur coussin d'air

➔ **Énoncé**
p. 124

Lycée Victor Duruy, Paris

- 1 (a) La première partie du mouvement correspond aux points M_1 à M_9 , et la seconde partie du mouvement correspond aux points M_9 à M_{16} .
- (b) Dans la première partie le mouvement est circulaire (de centre O) et uniforme, car l'angle $\widehat{M_i O M_{i+1}}$ est le même pour tout i de 1 à 8. Dans la seconde partie le mouvement est rectiligne (les points correspondants sont alignés sur une droite) et uniforme (car la distance d'un point au suivant est constante).
- 2 Pour évaluer la vitesse au point M_5 , on mesure la distance séparant les points M_4 et M_6 , puis on divise par l'intervalle de temps 2τ séparant les passages par ces points. On trouve :

$$d(M_4, M_6) \approx 1,6 \text{ cm,}$$

donc on a :

$$v_5 = \frac{d(M_4, M_6)}{2\tau} \approx \frac{1,6 \times 10^{-2}}{2 \times 10 \times 10^{-3}} \approx 0,80 \text{ m.s}^{-1}.$$

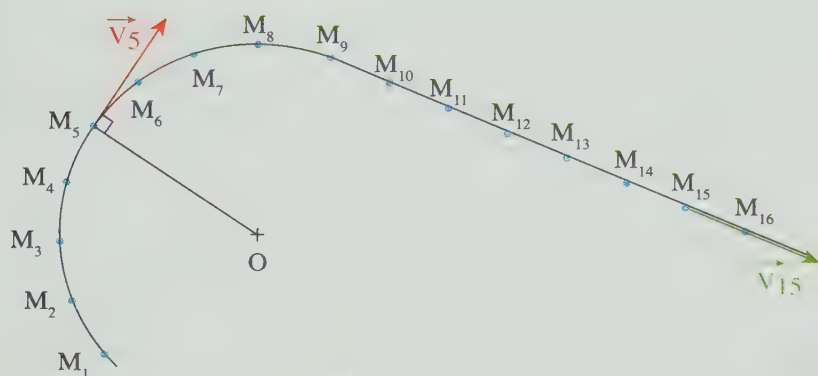
La flèche représentant le vecteur vitesse en M_5 doit donc avoir une longueur de $0,80/0,4 = 2,0$ cm.

De la même manière on a :

$$v_{15} = \frac{d(M_{14}, M_{16})}{2\tau} \approx \frac{1,6 \times 10^{-2}}{2 \times 10 \times 10^{-3}} \approx 0,80 \text{ m.s}^{-1}.$$

La flèche représentant le vecteur vitesse en M_{15} doit donc avoir une longueur de $0,80/0,4 = 2,0$ cm.

On représente les vecteurs vitesse demandés sur la figure ci-contre :



11 Trajet autoroutier

➔ **Énoncé**
p. 125

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 Décomposons le trajet en deux parties :

- Le tronçon sans travaux, de longueur $l_1 = 20$ km, couvert à la vitesse $v_1 = 120 \text{ km.h}^{-1}$, effectué en un temps t_1 .
- Le tronçon avec travaux, de longueur $l_2 = 20$ km, couvert à la vitesse $v_2 = 40 \text{ km.h}^{-1}$, effectué en un temps t_2 .

On a simplement :

$$\begin{cases} t_1 = \frac{l_1}{v_1} \\ t_2 = \frac{l_2}{v_2} \end{cases}$$

soit :

$$t_1 = \frac{20}{120} = \frac{1}{6} \text{ h} = 10 \text{ min} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{20}{40} = \frac{1}{2} \text{ h} = 30 \text{ min}.$$

Le temps total pour effectuer le trajet est donc :

$$t = t_1 + t_2 = 10 + 30 = 40 \text{ min} = \frac{2}{3} \text{ h}.$$

2 La vitesse moyenne sur l'ensemble du trajet est, par définition :

$$\text{vitesse} = \frac{\text{distance}}{\text{temps}} = \frac{l_1 + l_2}{t}.$$

L'application numérique donne :

$$v = \frac{40}{\frac{2}{3}} = 60 \text{ km.h}^{-1}.$$

La vitesse moyenne de la voiture sur le trajet a donc été de 60 km.h^{-1} .
Au vu des données de l'énoncé, on aurait pu naïvement s'attendre à

une vitesse moyenne de $\frac{1}{2}(120 + 40) = 80 \text{ km.h}^{-1}$. Toutefois le résultat n'est pas aussi simple. D'une certaine manière, les basses vitesses ont un « rôle » beaucoup plus important lorsqu'on évalue une vitesse moyenne. C'est la raison pour laquelle le moindre ralentissement lors d'un voyage en voiture fait considérablement chuter la moyenne.

Remarque : on pourra vérifier, à titre d'exercice, que la vitesse moyenne est la moyenne *harmonique* des vitesses du tronçon rapide et du tronçon lent. La moyenne harmonique est l'inverse de la moyenne des inverses.

12 Au gré du courant

Enoncé
p. 125

Lycée Léonard Limosin, Limoges

Pour répondre aux questions de cet exercice, on se place dans le référentiel lié à l'eau du fleuve. Il serait maladroit de raisonner dans le référentiel lié aux rives (à la terre). Cela compliquerait de beaucoup, et inutilement, les calculs à effectuer.

- 1 Dans le référentiel lié à l'eau du fleuve, le caisson est immobile et le bateau s'en éloigne à la vitesse $V_b = 15 \text{ km.h}^{-1}$. Au bout de cinq minutes, la distance séparant le bateau du caisson de vivres est donc :

$$d = \frac{5}{60} \times 15 = 1.25 \text{ km.}$$

On notera qu'il faut diviser le temps (5 minutes) par 60 pour l'obtenir en heures. La vitesse étant donnée en kilomètres par heure, on obtient la distance parcourue en kilomètres.

- 2 Dans le référentiel lié à l'eau, puisque le caisson est immobile et que le bateau est toujours animé d'une vitesse V_b , il va mettre exactement le même temps ($t = d/V_b$) pour revenir vers le caisson qu'il a mis à s'en éloigner, à savoir 5 min.

10 La mouche et le coche

Enoncé
p. 126

Lycée Camille Guérin, Poitiers

- 1 La vitesse relative du coche partant de B par rapport au coche partant de A est $v_{b/a} = 2v = 50 \text{ km.h}^{-1}$.
Les deux coches sont initialement distants de $d(A, B) = 75 \text{ km}$ donc ils mettent un temps :

$$t = \frac{d(A, B)}{v_{b/a}} = \frac{75}{50} = 1,5 \text{ h}$$

à se rejoindre.

Les deux coches vont donc se croiser à treize heures trente.

Une autre façon de répondre à cette question est de constater que les deux coches vont à la même vitesse, et vont donc se croiser à mi-parcours.

Le voyage dure au total $75/25 = 3$ h, donc ils se croisent au bout d'une heure trente.

- 2** Il s'agit ici d'un problème célèbre vieux de plusieurs siècles. À première vue on est tenté de décomposer le problème en étudiant individuellement chacun des trajets de la mouche. Toutefois, il y a beaucoup plus simple, et la réponse peut pratiquement s'obtenir de tête. Essayer d'y réfléchir encore en vous appuyant sur cette indication, si vous n'avez pas encore trouvé. Sinon, lisez la suite.

La mouche vole *pendant une heure et demie* puisque c'est le temps que mettent les coches pour se rejoindre. Pendant tout ce temps, elle vole à la vitesse $v' = 50 \text{ km.h}^{-1}$, donc la distance qu'elle a parcourue au total est simplement :

$$\text{distance} = \text{temps} \times \text{vitesse} = 1,5 \times 50 = 75 \text{ km.}$$

MÉTHODE

On notera que dans tout cet exercice les temps sont systématiquement exprimés en heures, les distances en kilomètres, et les vitesses en kilomètres par heure. On peut donc sans risque d'erreur poser directement les calculs sans convertir les grandeurs aux unités du Système International.

14 Course automobile

 **Enoncé**
p. 126

Lycée Henri IV, Paris

- 1** On calcule le temps que met le pilote A pour franchir la ligne d'arrivée :

$$t_A = \frac{d_A}{v_A},$$

où $d_A = 701 \text{ m}$ est la distance le séparant de la ligne d'arrivée, et $v_A = 272 \text{ km.h}^{-1}$ est sa vitesse, supposée constante. Pour effectuer l'application numérique, il faut au préalable convertir la vitesse en mètre par seconde.

MÉTHODE

Pour convertir des kilomètres par heure en mètres par seconde, on divise par 3,6.

Nous avons donc :

$$v_A = \frac{272}{3,6} = 75,6 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_A = \frac{701}{75,6} = 9,27 \text{ s.}$$

De la même manière nous avons, pour le pilote B :

$$v_B = \frac{285}{3,6} = 79,2 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_A = \frac{751}{79,2} = 9,48 \text{ s.}$$

Le pilote B met plus de temps pour franchir la ligne d'arrivée, c'est donc le pilote A qui gagne la course. La durée qui sépare leurs franchissements respectifs de la ligne d'arrivée est :

$$\tau = t_B - t_A = 0,21 \text{ s}$$

soit vingt et un centièmes de seconde.

- 2** Pour que les deux pilotes soient ex-æquo, il faudrait que $t_A = t_B$, c'est-à-dire :

$$\frac{d_A}{v_A} = t_B \quad \text{soit :} \quad v_A = \frac{d_A}{t_B} = \frac{701}{9,48} = 73,9 \text{ m.s}^{-1}.$$

On exprime à présent ce résultat en kilomètres par heure. Nous avons : $v_A = 73,9 \times 3,6 = 266 \text{ km.h}^{-1}$. Il faudrait que la vitesse du pilote A soit 266 km.h^{-1} pour que les deux voitures arrivent ex-æquo.

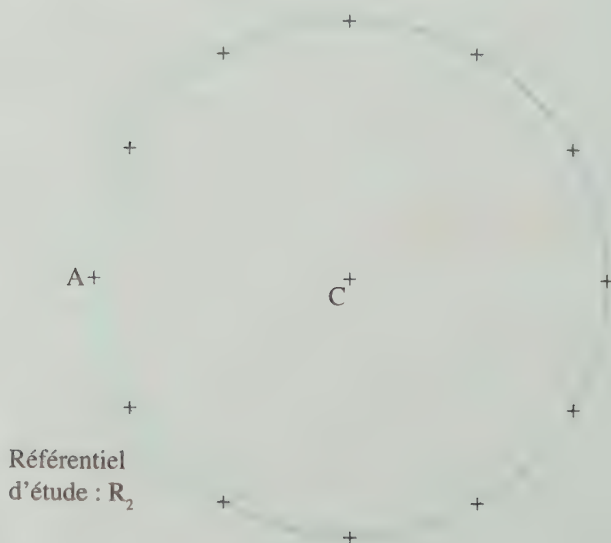
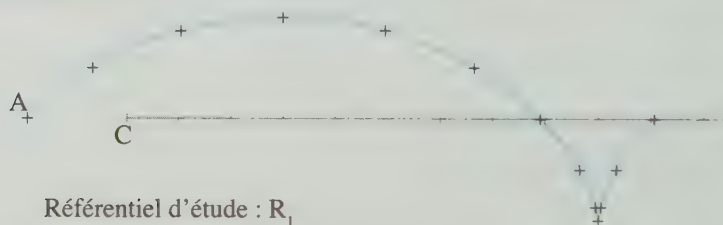


Roue de vélo

Enoncé
p. 126

Lycée Ampère, Lyon

- 1** Les trajectoires des deux points A et C sont reportées sur les figures suivantes.



- 2** La technique utilisée est appelée la chronophotographie.
- 3** On voit que, dans le référentiel R_1 , le centre de la roue est animé d'un mouvement rectiligne uniforme. En outre, lorsque le point A passe en contact avec la route (au plus bas de sa trajectoire), il a une vitesse nulle. Le référentiel R_1 est donc le référentiel lié à la route (référentiel terrestre).
- Dans le référentiel R_2 , le centre de la roue est immobile. Le référentiel R_2 est donc le référentiel lié au vélo.
- 4** Dans le référentiel R_1 , la trajectoire de A n'est pas uniforme : la distance entre deux points consécutifs varie au cours du temps (la courbe décrite par le point A est appelée une cycloïde). Dans ce même référentiel, le point C est animé d'un mouvement rectiligne uniforme, ainsi qu'on l'a vu à la question précédente.
- Dans le référentiel R_2 , le point C est immobile, et le point A est animé d'un mouvement circulaire. Ce mouvement circulaire est uniforme car la distance entre deux points consécutifs est constante.
- 5** Le point A est celui qui atteint la plus grande vitesse dans le référentiel terrestre (R_1), puisque la distance séparant deux positions consécutives du point A sur la chronophotographie correspondante peut être plus grande que la distance séparant deux positions consécutives du point C.
- 6** De la même manière, il s'agit du point A, puisque la distance séparant deux positions consécutives du point A dans le référentiel R_1 peut être plus petite que la distance séparant deux positions consécutives du point C. Ceci a lieu, en particulier, lorsque le point A approche du sol. Lorsqu'il est en contact avec le sol, sa vitesse est nulle (sans quoi cela signifierait que le pneumatique dérape).

16 Train Grande Vitesse

→ **Énoncé**
p. 128

Lycée Jeanne d'Albret, Saint Germain en Laye

- 1** (a) Les vitesses sont mesurées dans le référentiel terrestre.
- (b) L'unité du Système International est le mètre par seconde. Pour convertir des kilomètres par heure en mètres par seconde, on divise par 3,6 :

$$v_A = \frac{380}{3,6} = 1,06 \times 10^2 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_T = \frac{300}{3,6} = 83,3 \text{ m.s}^{-1}.$$

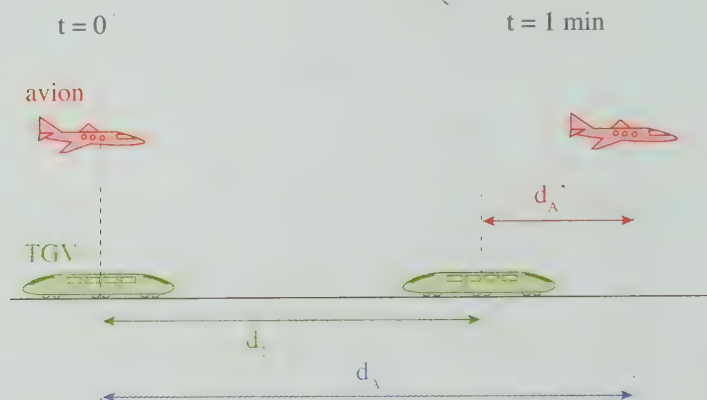
- 2** (a) Au bout de $t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$, l'avion aura parcouru, dans le référentiel terrestre, la distance :

$$d_A = t v_A = 60 \times 1,06 \times 10^2 = 6,36 \times 10^3 \text{ m}.$$

- (b) À la même date, le TGV aura parcouru la distance :

$$d_T = t v_T = 60 \times 83,3 = 5,00 \times 10^3 \text{ m}.$$

- (c) Les positions des deux véhicules à l'instant initial et après une minute sont représentées sur la figure ci-dessous :



- (d) Au bout d'une minute, l'avion a parcouru la distance $d'_A = d_A - d_T$ dans le référentiel du TGV. Cette distance vaut :

$$d'_A = 1,36 \times 10^3 \text{ m}$$

et la vitesse de l'avion dans le référentiel du TGV s'en déduit par :

$$v'_A = \frac{d'_A}{t} = \frac{1,36 \times 10^3}{60} = 22,7 \text{ m.s}^{-1}.$$

On multiplie cette valeur pour l'obtenir en kilomètres par heure :

$$v'_A = 22,7 \times 3,6 = 82 \text{ km.h}^{-1}.$$

Notons que l'on devrait trouver la différence de vitesse $v_A - v_T = 80 \text{ km.h}^{-1}$, ce qui n'est pas exactement le cas, à cause des erreurs d'arrondi successives au cours de l'exercice. Si l'on avait gardé un plus grand nombre de chiffres significatifs dans les résultats intermédiaires, on aurait retrouvé une valeur beaucoup plus proche des 80 km.h^{-1} attendus.

Le principe d'inertie

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Effet d'une force sur le mouvement d'un corps
3. Principe d'inertie
4. Principe de l'action-réaction
5. Considérations énergétiques
6. Quelques forces particulières

Thème : la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Saint-Martin, Pontoise

La voiture représentée ci-dessous, de poids $6\,000\text{ N}$, roule à vitesse constante sur une route droite. La force exercée par l'air sur la carrosserie est horizontale et dirigée vers l'arrière, et de valeur $2\,000\text{ N}$. Représenter sur un schéma le poids, la force exercée par l'air et la réaction de la route. On prendra pour échelle 1 cm pour $1\,000\text{ N}$.



Indication :

On supposera la réaction de la route appliquée pour moitié sur l'essieu avant et pour moitié sur l'essieu arrière.

Voir corrigé page 147

Ce chapitre introduit la notion de force et le principe d'inertie. On donne une condition d'équilibre d'un système. Nous introduisons également la notion d'énergie cinétique d'un système.

2 Effet d'une force sur le mouvement d'un corps

2.1 Rappel

Une force est représentée par un vecteur. La direction et le sens du vecteur la représentant sont ceux de la force. La norme (« longueur ») de ce vecteur est la valeur de la force. Elle s'exprime, dans les unités du Système International, en newton, de symbole N. Enfin, une force possède un point d'application.

Une force peut se mesurer à l'aide d'un dynamomètre.

2.2 Effet d'une force parallèle au mouvement

- *Dans le sens du mouvement* : une force parallèle et de même sens que le mouvement ne modifie pas la trajectoire, mais augmente la vitesse.

Exemple : la force de poussée $\vec{F}$ sur le wagonnet de la figure ci-dessous est parallèle et de même sens que le mouvement.

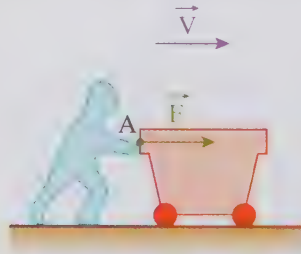


Figure 6.1 – La force exercée par l'opérateur accélère le wagonnet. Le wagonnet accélère. Sa trajectoire n'est pas modifiée (elle reste une droite).

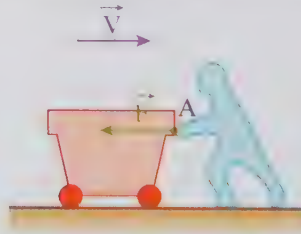


Figure 6.2 – La force exercée par l'opérateur freine le wagonnet.

- *Dans le sens opposé au mouvement* : une force parallèle et de sens contraire au mouvement ne modifie pas la trajectoire, mais diminue la vitesse.

Exemple : la force de freinage $\vec{F}$ sur le wagonnet de la figure ci-dessus est parallèle et de sens opposé au mouvement.

Le wagonnet ralentit. Sa trajectoire n'est en revanche pas modifiée (elle reste une droite).

Effet d'une force perpendiculaire au mouvement

Une force perpendiculaire au mouvement ne modifie pas la vitesse mais modifie la trajectoire.

Exemple : on lance le mobile autoporteur de la figure ci-dessous sur le plan horizontal.

La tension de la corde à laquelle il est attaché est constamment perpendiculaire à la vitesse. Il décrit un arc de cercle à vitesse constante.

En revanche on voit que la trajectoire est, elle, modifiée par l'action de la force : sans celle-ci, la trajectoire serait une droite au lieu d'être un arc de cercle.

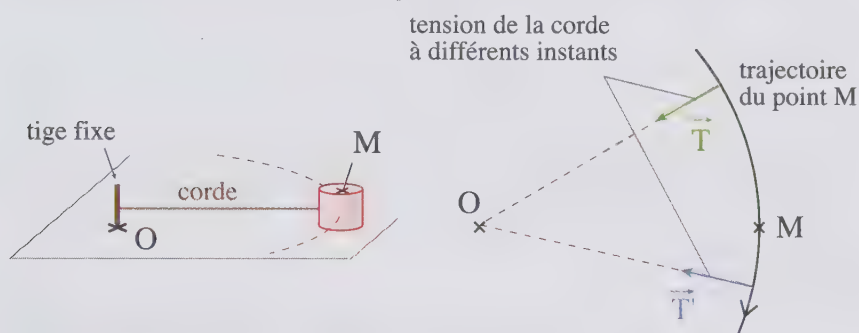


Figure 6.3 – Le mobile autoporteur a une trajectoire circulaire.

2.4 Cas général

Dans le cas où la force n'est ni parallèle ni perpendiculaire au mouvement, elle modifie à la fois la vitesse et la trajectoire du système.

2.1 Influence de la masse

L'influence d'une force donnée sur la vitesse ou la trajectoire d'un système de masse m est d'autant plus faible que la masse de m est grande.

Exemple : en appliquant la même force au wagonnet, on va avoir beaucoup plus de mal à accélérer celui de droite, qui est plein.



Figure 6.4 – Accélérer le wagonnet de gauche est plus facile.

3 Principe d'inertie

1.1 Énoncé

➔ À RETENIR

Dans un référentiel galiléen, tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent.

Par « qui se compensent » on entend que la somme vectorielle des forces est nulle. La réciproque est vraie : si un corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme lorsque les forces qui s'exercent sur lui se compensent, c'est que le référentiel d'étude est galiléen.

Tout référentiel en mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport au référentiel géocentrique peut être considéré comme galiléen. On considère fréquemment que le référentiel terrestre est galiléen.

3.2 Exemples

- Un cas très particulier de corps soumis à une somme vectorielle de forces nulle est un corps éloigné de toute masse (planète, étoile), complètement isolé dans l'espace. Ce genre de situation est exclu dans le référentiel terrestre, où les corps sont au moins soumis à une force : leur poids.
- Un objet posé sur une table, et donc au repos, est soumis à deux forces qui se compensent : son poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$ de la table.
Nous avons

$$\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}.$$

Cette situation est représentée sur la figure de la page suivante.

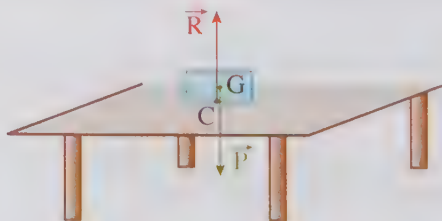


Figure 6.5 – L'objet est au repos sur la table donc soumis à des forces qui se compensent.

Conditions terrestres

Comme nous l'avons mentionné dans les exemples ci-dessus, un corps soumis à aucune force devrait être soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne uniforme. Ceci peut sembler en contradiction avec l'expérience quotidienne : un corps soumis à aucune force ou à des forces qui se compensent nous semble devoir être nécessairement au repos.

En général les forces dites de frottement vont rapidement conduire à l'immobilisation du système dans le référentiel terrestre. Il existe toutefois des exceptions. Un parachutiste, une fois son parachute déployé, est soumis à des forces qui se compensent : son poids d'une part, et la friction de l'air sur son parachute d'autre part. Dans ce cas, il n'est pas au repos, mais animé d'un mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre.

Conditions d'équilibre d'un corps

Des sections qui précèdent nous pouvons déduire que pour qu'un corps soit en équilibre (au repos), il faut qu'il soit soumis à des forces qui se compensent. Cette condition d'équilibre est utile dans bon nombre d'exercices.

Principe de l'action-réaction

On considère deux systèmes A et B, et l'on note $\vec{F}_{A/B}$ la force exercée par le système A sur le système B, et $\vec{F}_{B/A}$ la force exercée par le système B sur le système A.

À RETENIR

La force exercée par le système A sur le système B a même valeur, même direction, et sens opposé, à la force exercée par le système B sur le système A :

$$\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}.$$

Cette égalité porte le nom de « loi des actions réciproques », « loi de l'action et de la réaction », ou « principe d'interaction ». C'est également la 3^e loi de Newton. Elle est *toujours* vérifiée, que les systèmes A et B soient ou non en équilibre.

Considérations énergétiques

À RETENIR

À tout corps de masse m animé d'une vitesse v par rapport à un référentiel donné on associe une grandeur appelée énergie cinétique, notée E_C , définie par :

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2$$

L'énergie cinétique dépend donc de la valeur de la vitesse, mais pas de sa direction.

Lorsqu'une force fait varier la norme de la vitesse, elle fait donc varier son énergie cinétique. C'est le cas pour une force parallèle à la trajectoire, mais pas pour une force perpendiculaire à la trajectoire.

Nous avons vu en effet au paragraphe 2.2 qu'une force parallèle au mouvement modifie la vitesse. Elle modifie donc l'énergie cinétique. En revanche, nous avons vu au paragraphe 2.3 qu'une force perpendiculaire au mouvement modifie la direction suivie par le corps, sans changer la valeur de la vitesse. Elle ne modifie donc pas l'énergie cinétique.

6 Quelques forces particulières

6.1 Poids d'un système

Cette force sera plus amplement étudiée au chapitre suivant. Le poids $\vec{P}$ de tout système (sur Terre) est une force dirigée vers le bas, et dont la valeur est donnée par $P = m \times g$ où $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$, et où m est la masse du système.

6.2 Tension d'une corde

Une corde tendue exerce sur ce qui la tend à ses extrémités une force, appelée tension, parallèle à la corde.

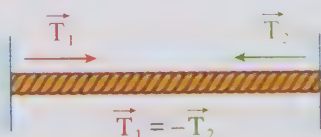


Figure 6.6 – Tension exercée par une corde.

La tension de la corde à ses extrémités a même valeur et même direction, mais des sens opposés :

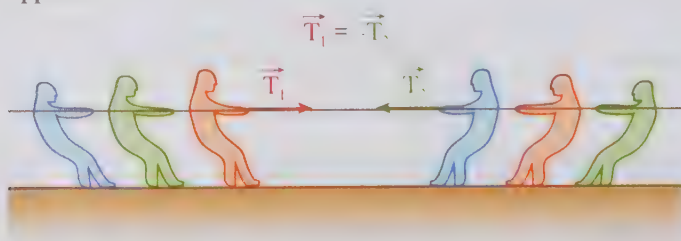


Figure 6.7 – La tension a même valeur aux deux extrémités de la corde.

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Saint-Martin, Pontoise

La voiture est animée d'un mouvement rectiligne uniforme, donc d'après le principe d'inertie la somme vectorielle des forces qui lui sont appliquées est nulle, soit :

$$\vec{R} + \vec{P} + \vec{F} = \vec{0},$$

où $\vec{R}$ est la réaction de la route. Si on appelle $\vec{R}_1$ et $\vec{R}_2$ respectivement la réaction de l'essieu avant et de l'essieu arrière, alors on a, d'après l'énoncé :

$$\vec{R}_1 = \vec{R}_2 = \frac{\vec{R}}{2}.$$

On en déduit la figure suivante (on construit d'abord le vecteur $\vec{R} = -\vec{P} - \vec{F}$, puis on en prend la moitié).

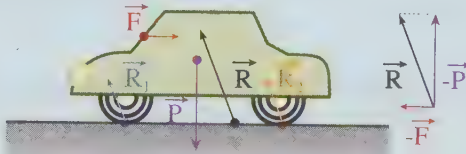


Figure 6.8 – Bilan des forces s'exerçant sur la voiture.

La réaction de la route a une partie verticale, et une partie horizontale dirigée vers l'avant, qui est due à la traction du moteur.

Voir énoncé page 141

1 Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 157

- 1 On applique une même force à deux systèmes de masse différente, initialement au repos. Le système qui va avoir la plus grande vitesse est :
☐ a le plus léger ☐ b le plus lourd
- 2 Si on veut éviter de changer la vitesse d'un corps, il faut lui appliquer une force
☐ a parallèle ☐ b perpendiculaire
 à la trajectoire.
- 3 Aristote disait : « Pas de force, pas de mouvement ». Avait-il raison ?
☐ a oui ☐ b non
- 4 Un corps soumis à une seule force, de valeur non nulle, a une trajectoire rectiligne. Son mouvement peut être uniforme :
☐ a oui ☐ b non
- 5 Une force modifie toujours l'énergie cinétique d'un système :
☐ a oui ☐ b non
- 6 Un système au repos a une énergie cinétique nulle :
☐ a oui ☐ b non

2 Dynamomètre



5 min

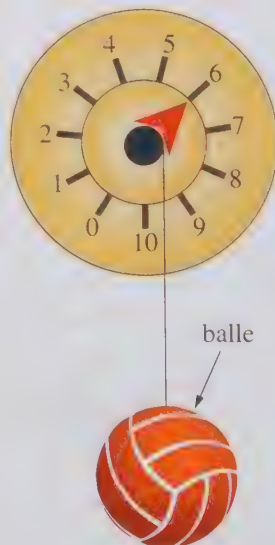
Corrigé
p. 157

Lycée Eugène Delacroix, Montrouge

On considère une balle accrochée à un dynamomètre, comme représenté sur la figure ci-contre. Il indique une force de 6 N.

- 1 Comment s'appelle la force mesurée, dans ce cas, par le dynamomètre ?
- 2 Quelle serait l'indication d'une balance si l'on posait la balle dessus ?

Donnée : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.



3 Mouvement d'une voiture



10 min

Corrigé
p. 157

Lycée Janson de Sailly, Paris

Le mouvement d'une automobile sur une route droite et horizontale comporte les trois phases suivantes :

- Accélération uniforme de 0 à 80 km.h^{-1} , en $t_1 = 9 \text{ s}$.
- Vitesse constante $v = 80 \text{ km.h}^{-1}$ pendant $t_2 = 12 \text{ s}$.
- Décélération uniforme jusqu'à l'arrêt du véhicule en $t_3 = 5 \text{ s}$.

- 1 Pendant quelle phase du trajet les forces s'exerçant sur la voiture se compensent-elles ?
- 2 Représenter le graphe de la vitesse en fonction du temps.

Ski sur tremplin



5 min

Corrigé
p. 158

Lycée Masséna, Nice

On considère des skieurs qui dévalent un tremplin de forme arrondie.

Parmi les cas représentés ci-dessous, lesquels sont impossibles ? Trier les cas possibles par ordre croissant de vitesse du skieur au moment où il quitte le tremplin.

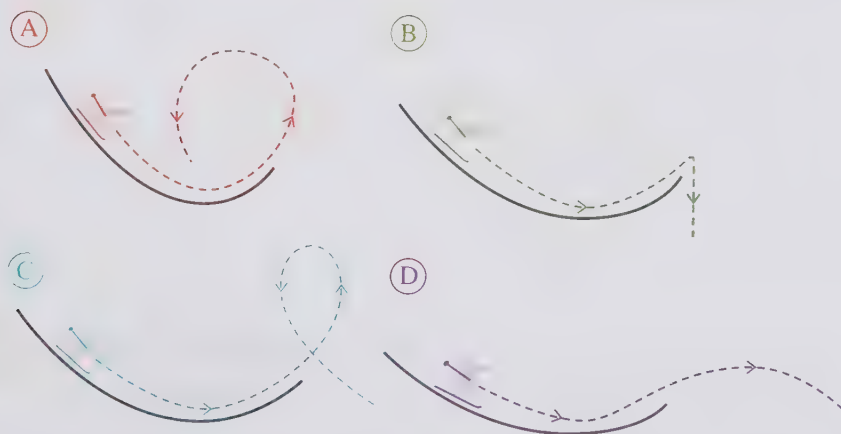


Figure 6.9 – La ligne pointillée représente la trajectoire du centre de masse du skieur.

5

Principe d'inertie

15 min

Corrigé
p. 158**Lycée Florent Schmitt, Saint-Cloud**

- 1 Énoncer le principe d'inertie.
- 2 Indiquer si chacun des systèmes ci-dessous est soumis à un ensemble de forces qui se compensent, en justifiant.
 - (a) Un avion en vol de croisière, à vitesse et altitude constantes, face au vent.
 - (b) Un avion en vol de croisière, à vitesse et altitude constantes, en vent arrière.
 - (c) Le passager d'une voiture qui accélère.
 - (d) Un touriste sur une montagne russe.
 - (e) Une valise dans le coffre d'une voiture qui roule à 120 km.h^{-1} sur une autoroute rectiligne.
 - (f) La même valise lorsque la voiture aborde un virage à 80 km.h^{-1} (vitesse constante).

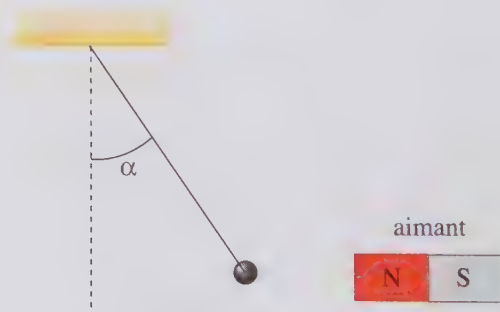
6

Bille d'acier

5 min

Corrigé
p. 159**Lycée Stanislas, Paris**

Une bille en acier, accrochée à un fil, est attirée par un aimant.



Représenter sur le schéma les différentes forces auxquelles est soumise la bille en équilibre. On admettra que la force exercée par l'aimant est dirigée vers celui-ci.

7 Skieur en descente

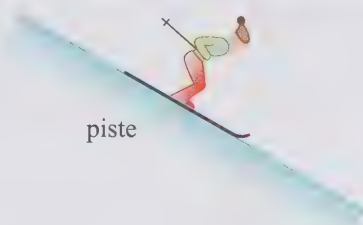


5 min

Corrigé
p. 160

Lycée Montaigne, Bordeaux

Un skieur descend une piste enneigée, de pente constante, à vitesse constante.



- 1 Dresser l'inventaire des forces s'exerçant sur le skieur.
- 2 Quelle relation vectorielle vérifient ces forces ? Justifier.

8 Bilans des forces



20 min

Corrigé
p. 160

Lycée Sainte-Marie, Antony

La voiture représentée sur la figure ci-dessous roule à une vitesse uniforme sur une autoroute droite (sans virage). Pour chaque système représenté en rouge, effectuer un bilan des forces extérieures et les représenter vectoriellement.

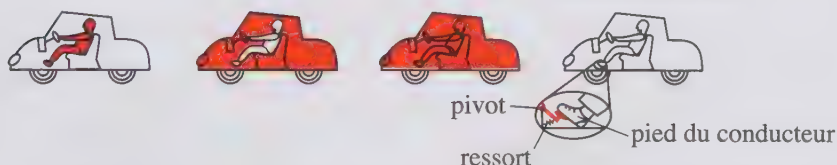


Figure 6.10 – Représentation des quatre systèmes de l'énoncé.

Glissement sans frottement



10 min

Corrigé
p. 162

Lycée Saint-Martin, Pontoise

On considère un palet de hockey sur glace, immobile, sur un sol glacé horizontal. Sa masse est $m = 100 \text{ g}$.

- 1 Faire le bilan des forces s'exerçant sur ce palet. Quelle est leur somme ? On effectuera un schéma soigné.
- 2 On frappe le palet avec une crosse, tangentiellement à la glace. Si on néglige les frottements du palet sur la glace, caractériser le mouvement du palet après la frappe.
- 3 Que se passe-t-il si les frottements du palet sur la glace ne sont pas négligeables ? On effectuera un schéma.

10 Échelle et mur

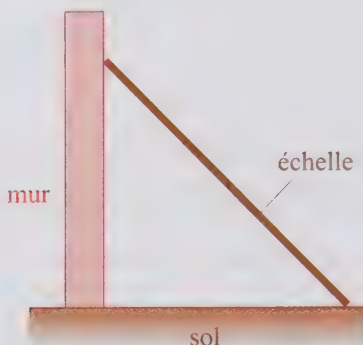


5 min

Corrigé
p. 163

Lycée Toulouse-Lautrec, Toulouse

On considère une échelle appuyée contre un mur, qui repose sur un sol rugueux pour éviter qu'elle ne dérape. Le système {échelle} est donc à l'équilibre. Le mur étant parfaitement lisse, on admettra que la force exercée par le mur sur l'échelle, appelée réaction du mur, est perpendiculaire à celui-ci. Dresser l'inventaire des forces exercées sur l'échelle et les représenter.



11 Singe et liane

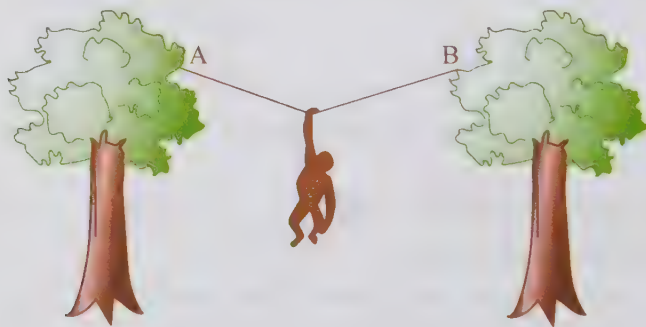


10 min

Corrigé
p. 164

Lycée Saint-Sernin, Toulouse

Un singe est accroché à une liane, qui se trouve elle-même accrochée à deux branches.



- 1 Quelles sont les forces exercées sur le singe ?
- 2 Quelles sont les forces exercées par la liane sur la branche au point A, et sur l'autre branche au point B ?

Indication : la force exercée par une corde (ou liane) tendue sur un système à son extrémité, est appelée tension de la corde. Elle a même direction que celle-ci.

12 Trajectoire balistique

★★

20 min

Corrigé
p. 164

Lycée Saint François de Sales, Évreux

Depuis un point O situé à la surface de la Terre, on tire avec une vitesse V un solide de petite dimension dans une direction faisant un angle α avec l'horizontale. On néglige les frottements de l'air. On réalise une chronophotographie de l'expérience, à intervalles de temps réguliers.



- 1 En utilisant le principe de l'inertie, montrer que le solide n'est ni isolé, ni pseudo-isolé.
- 2 En un point quelconque de la trajectoire, représenter et nommer la force qui agit sur le solide.
- 3 On projette le mouvement du solide sur l'axe perpendiculaire à la force identifiée à la question précédente. Quelle est la particularité du mouvement ainsi projeté ?

13 Mobile autoporteur

★★★

10 min

Corrigé
p. 165

Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne

On considère un mobile autoporteur sur coussin d'air. Il est attaché d'une part à un ressort relié à un point fixe, et d'autre part à une ficelle que peut tendre un opérateur.

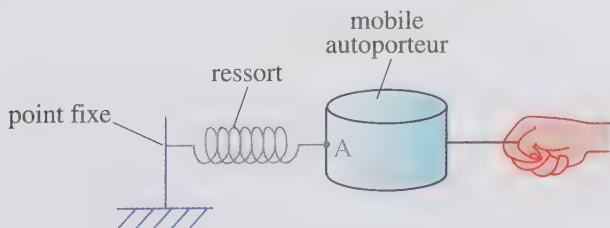


Figure 6.11 – Dispositif expérimental.

- 1 Initialement, le mobile est au repos. Que peut-on dire des forces qui s'exercent sur lui ? En donner une représentation vectorielle schématisée.

- 2 L'opérateur tend tellement la corde que le système d'attache du ressort en A se rompt. Que se passe-t-il ?
- 3 Quelles sont les caractéristiques du mouvement du mobile après la rupture ?
- 4 Ce mouvement peut être étudié par l'enregistrement représenté ci-dessous.

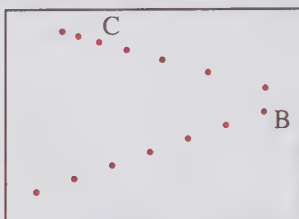


Figure 6.12 – Enregistrement de la trajectoire du mobile autoporteur.

- (a) Montrer que les caractéristiques du mouvement prévues à la question précédente sont vérifiées.
- (b) Que se passe-t-il vers le point B ?
- (c) Que se passe-t-il vers le point C ? Quelle peut en être la raison ?

14 Balistique d'une bille

★★★

15 min

Corrigé
p. 166

Lycée Pierre d'Aragon, Muret

On lance une bille en l'air avec une vitesse verticale $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$. Elle retombe au bout d'un temps $t = 2 \text{ s}$.

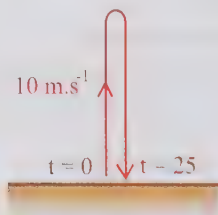


Figure 6.13 – Trajectoire schématique de la bille.

On la lance à présent avec un vecteur-vitesse $\vec{v}$ incliné de 45° ; dans la base $(\vec{i}, \vec{j})$ représentée ci-dessous, les coordonnées de $\vec{v}$ sont $(10 \text{ m.s}^{-1}; 10 \text{ m.s}^{-1})$.

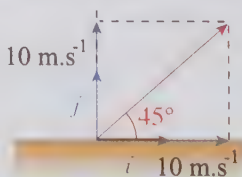


Figure 6.14 – La bille est lancée avec un angle de 45° par rapport à l'horizontale.

- 1 Représenter schématiquement la trajectoire de la bille.
- 2 Au bout de combien de temps touche-t-elle le sol ?
- 3 À quelle distance de son point de départ touche-t-elle le sol ?

15 Mobile autoporteur

★★★

15 min

Corrigé
p. 167

Lycée Bergson, Paris

On considère l'enregistrement d'un mobile autoporteur représenté ci-dessous :



Figure 6.15 – Enregistrement d'un mobile autoporteur.

Les points sont séparés par une durée fixe $\tau = 50$ ms.

- 1 Le mouvement est-il uniforme ?
- 2 Estimer la valeur de la vitesse instantanée v pour chaque couple de points consécutifs de l'enregistrement.
- 3 Tracer le graphe de la relation $v = f(t)$. Quelle est la nature de ce graphe ?
- 4 Quel est le comportement de l'énergie cinétique du mobile au cours du temps ?

16 Chronophotographie d'une bille

★★★

20 min

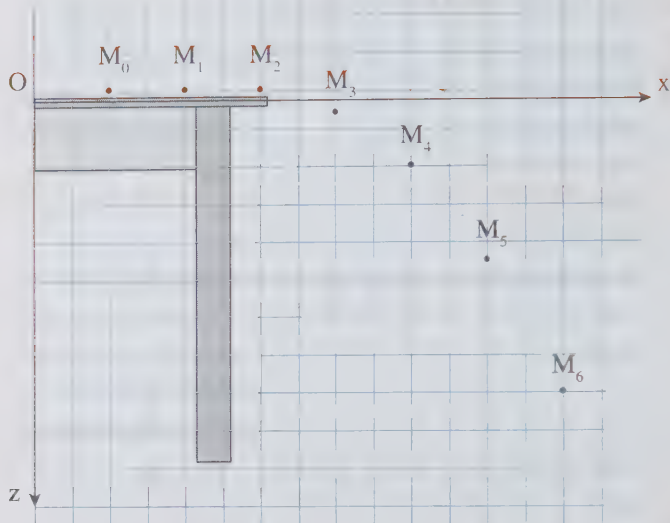
Corrigé
p. 168

Lycée Lavoisier, Paris

On considère une bille, assimilée à un point matériel, posée sur une table horizontale. À l'instant $t = 0$, on met la bille en mouvement en exerçant très brièvement sur elle une force horizontale. Une chronophotographie est réalisée grâce à une caméra, fixe par rapport à la table et dont le champ couvre toute la scène. On distingue deux phases :

- La phase 1, durant laquelle la trajectoire de la bille est rectiligne jusqu'à ce qu'elle atteigne le bord de la table (points M_0 à M_2).
- La phase 2, durant laquelle la bille chute (points M_2 à M_6).

Deux points successifs de la trajectoire sont séparés d'un intervalle de temps constant τ égal à 100 ms. La chronophotographie ci-après est à l'échelle $1/20^\circ$ (un centimètre sur celle-ci représente 20 centimètres sur le système étudié).



1 Étude de la phase 1.

- (a) On se place dans le référentiel lié à la caméra. Calculer la vitesse moyenne de la bille pendant la première phase.
- (b) Quelle est la nature du mouvement de la bille ?

2 Étude de la phase 2.

- (a) Représenter sur la chronophotographie le mouvement de la bille projeté sur l'axe (Ox).
- (b) Quelle est la nature du mouvement projeté sur cet axe ? (Justifier)
- (c) Représenter sur la chronophotographie le mouvement de la bille projeté sur l'axe (Oz).
- (d) Quelle est la nature du mouvement projeté sur l'axe (Oz).
- (e) Faire un bilan des forces extérieures s'appliquant sur la bille pendant la phase 2, en précisant la direction et le sens.
- (f) Justifier, en utilisant la réponse à la question précédente, la nature du mouvement projeté sur l'axe horizontal.

1 QCM Testez vos connaissances

Enoncé
p. 148

- 1 a. Il est d'autant plus difficile de changer la trajectoire ou la vitesse d'un corps que sa masse est grande.
- 2 b. (voir le cours).
- 3 b. Il avait tort : « pas de force » implique « pas de mouvement » OU « mouvement rectiligne uniforme ».
- 4 b. La force étant la seule appliquée et sa valeur n'étant pas nulle, elle modifie nécessairement la norme de la vitesse.
- 5 b. Une force perpendiculaire au mouvement ne modifie pas l'énergie cinétique.
- 6 a. Un corps au repos a une vitesse nulle : $v = 0$, donc $E_c = \frac{1}{2}mv^2 = 0$.

2 Dynamomètre

Enoncé
p. 148

Lycée Eugène Delacroix, Montrouge

- 1 La balle est en équilibre et soumise à deux forces : son poids et la tension du câble du dynamomètre. Ces deux forces se compensent en vertu du principe d'inertie, donc la force indiquée par le dynamomètre correspond au poids P de la balle. On a $P = 15$ N.
- 2 Bien qu'une balance mesure un poids, elle donne la masse de l'objet et non son poids (à la surface terrestre, le rapport entre les deux est toujours le même). On a :

$$m = \frac{P}{g} = 0,6 \text{ kg}$$

La balance indiquerait 0,6 kg.

3 Mouvement d'une voiture

Enoncé
p. 149

Lycée Janson de Sailly, Paris

- 1 Par application du principe d'inertie, les forces s'exerçant sur la voiture se compensent quand celle-ci est animée d'un mouvement rectiligne uniforme dans le référentiel terrestre, donc pendant la deuxième phase du trajet.
- 2 La vitesse en fonction du temps a l'allure représentée à la figure 6.16.

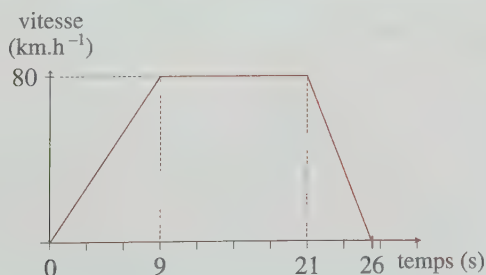


Figure 6.16 – Vitesse de la voiture en fonction du temps.

4 Ski sur tremplin

Enoncé
p. 149

Lycée Masséna, Nice

Lorsque le skieur quitte le tremplin, il n'est plus soumis qu'à son propre poids (on néglige la résistance de l'air). En outre, sa vitesse est dirigée vers le haut et la droite. Pour que le skieur revienne à un moment donné vers la gauche, il faudrait donc exercer sur lui, après son envol, une force qui ait une composante horizontale, dirigée vers la gauche. Ce n'est pas le cas puisque son poids est exclusivement vertical. Donc nous pouvons exclure d'emblée les cas A et C, dans lesquels le skieur revient vers la gauche pendant son vol plané.

Restent les cas B et D. D'après le cours, nous savons que la trajectoire d'un système soumis exclusivement à son poids est soit une droite, soit de forme parabolique. Les cas B et D sont donc tous les deux possibles. Dans le cas B, la vitesse du skieur au moment où il quitte le tremplin est très petite, et sa trajectoire est pratiquement celle d'un système initialement au repos qui tombe dans le champ de pesanteur terrestre : une droite verticale. En revanche, dans le cas D, il a une vitesse initiale non nulle (et sa trajectoire est parabolique).

5 Principe d'inertie

Enoncé
p. 150

Lycée Florent Schmitt, Saint-Cloud

- 1 Principe d'inertie : dans le référentiel terrestre, tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme si les forces qui s'exercent sur lui se compensent.
- 2 (a) L'avion a un mouvement rectiligne uniforme donc les forces qui s'exercent sur lui (son poids, la résistance de l'air et la poussée des réacteurs) se compensent.
- (b) Même chose qu'à la question précédente. Le fait qu'il reçoive le vent de face ou qu'il soit en vent arrière ne change rien à la conclusion : les forces se compensent.
- (c) On se place dans le référentiel terrestre. Nous pouvons y appliquer le principe d'inertie. Puisque dans ce référentiel le passager n'est ni au repos ni animé d'un mouvement rectiligne uniforme, les forces qui s'exercent sur lui (son poids et la réaction de la voiture) ne se compensent pas.

ATTENTION

Il est faux de vouloir appliquer le principe d'inertie dans le référentiel de la voiture. On conclurait ainsi de manière erronée que les forces s'exerçant sur le passager se compensent. Il faut prendre garde au référentiel d'étude pour appliquer le principe d'inertie.

- (d) On se place à nouveau dans le référentiel terrestre. Dans ce référentiel, la trajectoire du touriste n'est pas rectiligne. Cela suffit à assurer que les forces s'exerçant sur lui ne se compensent pas, par application du principe d'inertie. Notons que comme à la question précédente, il est exclu de se placer dans le référentiel de sa nacelle.
- (e) Dans le référentiel terrestre, la voiture (et la valise) sont animées d'un mouvement rectiligne uniforme, donc par application du principe d'inertie elles sont soumises à un ensemble de forces qui se compensent.
- (f) Dans le même référentiel, la valise n'a plus un mouvement rectiligne (le fait qu'il soit décrit à vitesse uniforme n'est pas suffisant). Donc les forces auxquelles elle est soumise ne se compensent pas.

Bille d'acier

Enoncé
p. 150

Lycée Stanislas, Paris

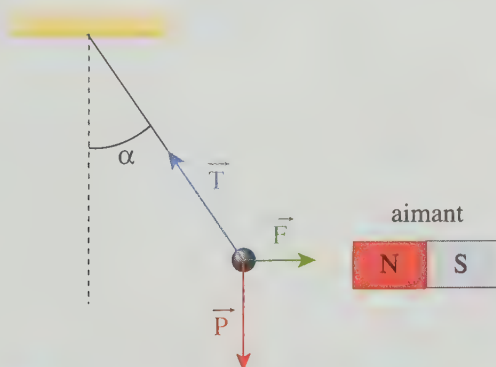
La bille d'acier est soumise à trois forces :

- Son propre poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas.
- La force $\vec{F}$ due à l'aimant, horizontale et dirigée vers celui-ci.
- La tension de la corde $\vec{T}$, dirigée selon celle-ci.

En outre, la somme vectorielle des trois forces est nulle :

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}.$$

On les représente sur la figure ci-dessous.



MÉTHODE

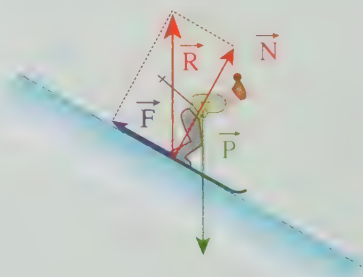
Graphiquement, il faut d'abord représenter soit la force horizontale (celle de l'aimant) ou verticale (le poids), puis représenter la tension de la corde (de manière à ce que sa projection sur l'axe de la première force compense celle-ci). Cela permet d'obtenir la projection sur l'autre axe, de manière à ce que la somme vectorielle des trois forces s'annule exactement.

7 Skieur en descente

Enoncé
p. 151

Lycée Montaigne, Bordeaux

- 1 Le skieur est soumis à deux forces : son propre poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas, et la réaction $\vec{R}$ de la piste sur ses skis. Cette réaction peut se décomposer en une composante perpendiculaire à la piste ($\vec{N}$) et une force de frottement due au vent et aux skis, notée $\vec{F}$, parallèle à la piste. On a : $\vec{R} = \vec{N} + \vec{F}$.
- 2 La piste a une pente constante, elle est donc rectiligne, et le skieur la descend à vitesse constante : le skieur est donc animé d'un mouvement rectiligne uniforme, et on peut donc lui appliquer le principe d'inertie : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$. La réaction de la piste est donc opposée au poids, ainsi qu'on l'a représentée sur la figure ci-dessous.



On constate que la réaction de la piste n'est pas perpendiculaire à celle-ci, donc le glissement des skis se fait avec frottements : $\vec{F}$ est non nulle. Ceci est parfaitement normal : s'il n'y avait pas de frottements, le mouvement du skieur serait un mouvement accéléré et non pas uniforme.

Bilans des forces

Enoncé
p. 151

Lycée Sainte-Marie, Antony

Chaque système de cet exercice est animé d'un mouvement rectiligne uniforme, donc les forces auxquelles ils sont soumis se compensent (leur somme vectorielle est nulle).

Bilan des forces dans le premier cas :

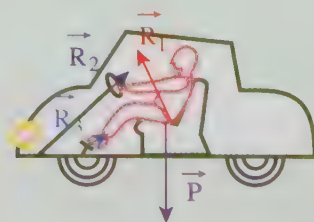


Figure 6.17 – Bilan des forces exercées sur le conducteur.

Le système « conducteur » est soumis aux forces :

- Son poids $\vec{P}$;
- La réaction $\vec{R}_1$ du siège ;
- La réaction $\vec{R}_2$ du volant ;
- La réaction $\vec{R}_3$ de la pédale d'accélérateur.

Dans le second cas :

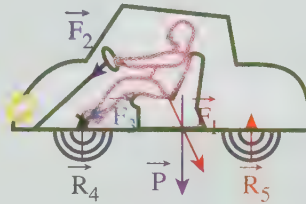


Figure 6.18 – Bilan des forces exercées sur le système voiture (hors conducteur).

Le système « voiture moins conducteur » est soumis aux forces :

- Son poids $\vec{P}$;
- La force $\vec{F}_1$ exercée par le conducteur sur le siège ;
- La force $\vec{F}_2$ exercée par le conducteur sur le volant ;
- La force $\vec{F}_3$ exercée par le conducteur sur la pédale d'accélérateur ;
- La réaction du sol sur l'essieu avant ($\vec{R}_4$) et arrière ($\vec{R}_5$).

On notera, en comparant au cas précédent, que l'on a : $\vec{R}_1 = -\vec{F}_1$, $\vec{R}_2 = -\vec{F}_2$, $\vec{R}_3 = -\vec{F}_3$.

Dans le troisième cas :

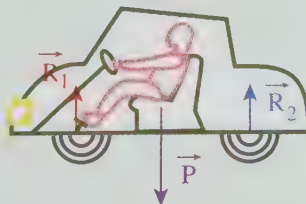


Figure 6.19 – Bilan des forces exercées sur le système voiture + conducteur.

Le système « voiture + conducteur » est soumis aux forces :

- Son poids $\vec{P}$;
- La réaction du sol sur l'essieu avant ($\vec{R}_1$) et arrière ($\vec{R}_2$).

Enfin, dans le dernier cas, la pédale d'accélérateur est soumise à quatre forces :

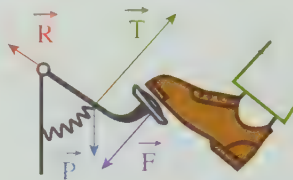


Figure 6.20 – Bilan des forces exercées sur la pédale d'accélérateur.

- Son poids $\vec{P}$;
- La force exercée par le pied du conducteur $\vec{F}$;
- la réaction $\vec{T}$ du ressort ;
- La réaction $\vec{R}$ du pivot de la pédale.



MÉTHODE

Bien évidemment, dans le cas de systèmes complexes comme celui étudié dans cet exercice, des variantes sont possibles : ainsi nous aurions pu détailler la réaction du sol au niveau de chaque roue au lieu de le faire au niveau de chaque essieu, nous aurions pu tenir compte de l'autre pied du conducteur, etc. Nous aurions pu tenir compte également de la résistance de l'air. Dans ce cas, il aurait fallu incliner légèrement la réaction du sol vers l'avant pour compenser la résistance de l'air (qui est une force horizontale opposée au mouvement, donc ici dirigée vers la gauche, si on suppose la voiture en marche avant).



Glissement sans frottement

Énoncé
p. 151

Lycée Saint-Martin, Pontoise

- 1 Le palet est soumis à son poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le haut, et à la réaction $\vec{R}$ de la glace, verticale et dirigée vers le haut. Puisqu'il est immobile (c'est-à-dire au repos dans le référentiel terrestre), ces deux forces se compensent : leur somme est nulle : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

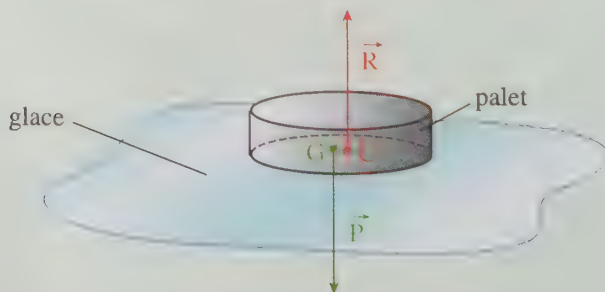


Figure 6.21 – Le palet est au repos donc soumis à des forces qui se compensent.

- 2** Si on frappe le palet tangentiellement à la glace, on lui communique une vitesse horizontale. Si on néglige les frottements de la glace, la réaction de celle-ci sur le palet est la même qu'au repos, et elle compense donc exactement son poids : le palet est donc soumis à un ensemble de forces qui se compensent, et par application du principe d'inertie dans le référentiel terrestre, il est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.
- 3** Si les frottements du palet sur la glace ne sont plus négligeables, il apparaît une composante horizontale de la réaction de la glace, qui s'oppose au mouvement. Le poids (qui lui, reste bien entendu toujours strictement vertical) et la réaction de la glace ne se compensent plus et la force résultante tend à décélérer le mouvement du palet, qui finit par s'arrêter.

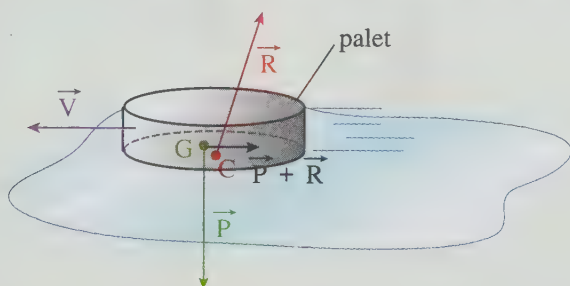


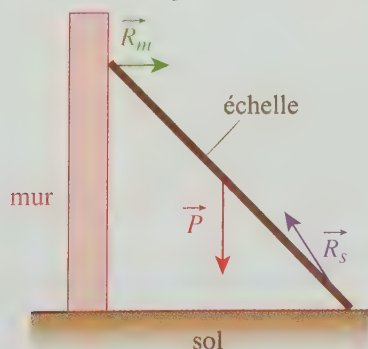
Figure 6.22 – Les deux forces exercées sur le palet ne se compensent pas et la vitesse du palet varie.

10 Échelle et mur

➔ **Énoncé**
p. 152

Lycée Toulouse-Lautrec, Toulouse

L'échelle est soumise à trois forces : son propre poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas, la réaction du sol $\vec{R}_s$, et la réaction du mur $\vec{R}_m$. Le mur étant parfaitement lisse la réaction du mur est perpendiculaire à celui-ci, donc horizontale. Enfin, le système étant à l'équilibre, la somme vectorielle des forces est nulle, comme représenté sur la figure ci-dessous.

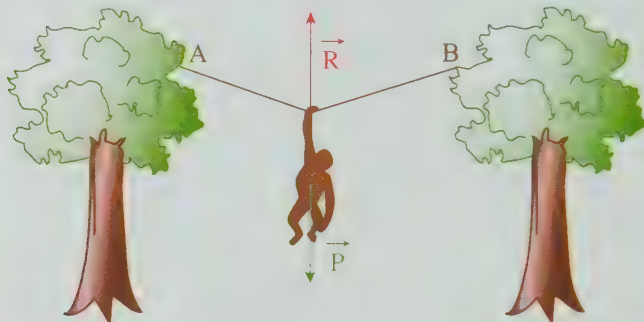


11 Singe et liane

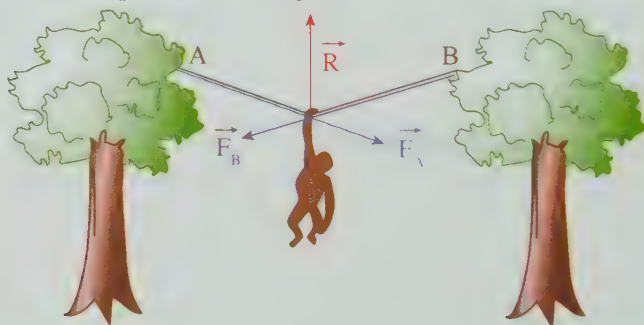
➔ **Énoncé**
p. 152

Lycée Saint-Sernin, Toulouse

- 1** Le singe est soumis à deux forces : son propre poids $\vec{P}$ et la réaction $\vec{R}$ de la liane. À l'équilibre, ces deux forces s'annulent, comme représenté sur la figure ci-dessous.



- 2** La force $\vec{F}_A$ exercée par la liane sur la branche au point A est égale à la tension de la liane en ce point. Elle est colinéaire à la liane. Le même raisonnement s'applique à la force $\vec{F}_B$ exercée par la liane sur la branche au point B. On note qu'à l'équilibre les trois forces exercées *sur la liane* sont $-\vec{F}_A$, $-\vec{F}_B$ et $-\vec{R}$ (en vertu du principe d'interaction ou loi d'action et réaction), donc la somme vectorielle de ces trois forces est nulle, comme représenté sur la figure ci-dessous.

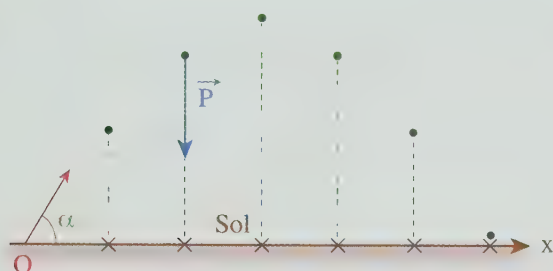


12 Trajectoire balistique

➔ **Énoncé**
p. 153

Lycée Saint François de Sales, Évreux

- 1** Si le solide était isolé ou pseudo-isolé, il aurait une trajectoire rectiligne uniforme, ce qui n'est pas le cas ici : la trajectoire n'est ni rectiligne, ni uniforme.
- 2** La force qui agit sur le solide en un point quelconque de sa trajectoire est son propre poids, vertical et dirigé vers le bas. Il s'agit de la seule force puisque l'on néglige les frottements de l'air. On la représente sur la figure ci-dessous.



- 3 Les projections des différents points de la trajectoire sur l'axe (Ox) sont représentées sur la figure précédente. Le poids n'ayant pas de projection sur cet axe, le mouvement projeté est rectiligne uniforme, ce que l'on constate en remarquant que les points projetés sont régulièrement espacés.

13 Mobile autoporteur

Enoncé
p 153

Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne

- 1 On adopte pour référentiel d'étude le référentiel terrestre. On peut donc y appliquer le principe d'inertie. Puisque le mobile y est au repos, les forces qui s'exercent sur le mobile se compensent. Elles sont :

- Son poids $\vec{P}$, vertical et dirigé vers le bas.
- La réaction $\vec{R}$ du coussin d'air, verticale et dirigée vers le haut.
- La tension $\vec{T}_1$ du ressort, horizontale et dirigée vers la gauche.
- La tension $\vec{T}_2$ de la corde, horizontale et dirigée vers la droite.

Ces forces sont représentées sur la figure 6.23. Les forces horizontales s'annulent deux à deux : $\vec{T}_1 + \vec{T}_2 = \vec{0}$, et les forces verticales également : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

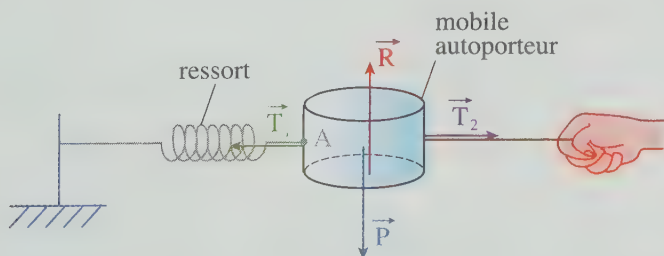


Figure 6.23 – Bilan des forces exercées sur le mobile autoporteur.

- 2 Lorsque le système d'attache du ressort se rompt, le mobile se voit brutalement accéléré vers la droite, par la tension de la corde. Très rapidement la corde se détend, et le mobile n'est alors plus soumis qu'à son poids et la réaction du coussin d'air, forces qui sont toutes deux verticales et se compensent. Par application du principe d'inertie (dans le référentiel terrestre), il adopte donc une trajectoire rectiligne uniforme.

- 3 (a) Les points de l'enregistrement jusqu'au point B sont alignés et équidistants. Comme prévu, le mouvement est donc rectiligne et uniforme.

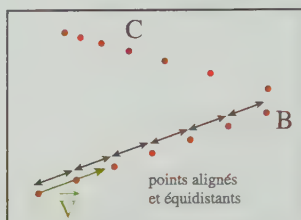


Figure 6.24 – Dans la première partie, le mouvement est rectiligne uniforme.

- (b) Peu après le point B, le mobile change de direction. Il a alors toujours un mouvement rectiligne uniforme, de vitesse identique à la précédente, mais vers la gauche et le haut. Il est donc vraisemblable que peu après le point B, le mobile heurte le bord de la table d'expérimentation. Pendant le choc, la réaction du bord lui communique pendant un bref instant une accélération intense qui le renvoie vers la gauche.
- (c) Peu après le point C, le mouvement cesse d'être uniforme. Par application du principe d'inertie, cela signifie que les forces agissant sur le mobile ne se compensent plus. Puisque le mouvement ralentit, une force s'y oppose. Ce peut être la réaction de la table si le mécanisme du coussin d'air fait défaut, ou la présence d'un obstacle sur la table, avec lequel le mobile entre en contact.

13 Balistique d'une bille

Lycée Pierre d'Aragon, Muret

Enoncé
p. 154

- 1 La bille effectue la trajectoire représentée à la figure ci-dessous. Il sera montré dans les classes ultérieures que cette trajectoire est une parabole.

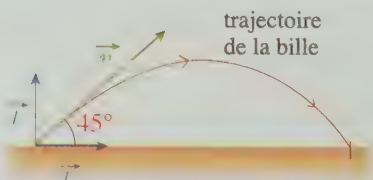


Figure 6.25 – Trajectoire de la bille.

- 2** La bille est soumise à une seule force : son poids, qui est vertical. D'après le cours, la vitesse est modifiée dans la direction de la force, et n'est pas modifiée dans la direction perpendiculaire. Étudions la bille dans un référentiel en translation rectiligne uniforme à la vitesse 10 m.s^{-1} vers la droite. Dans ce référentiel, la vitesse initiale de la bille est 10 m.s^{-1} vers le haut, donc on est ramené aux conditions de l'énoncé, et donc on peut affirmer que la bille touche le sol au bout de $t = 2 \text{ s}$.
- 3** La vitesse dans la direction perpendiculaire à la force n'est pas modifiée, donc elle reste en permanence, dans le référentiel terrestre, égale à $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$. La bille atterrit donc à une distance d de son point de départ donnée par :

$$d = v \times t = 10 \times 2 = 20 \text{ m}.$$

15 Mobile autoporteur

Enoncé
p. 155

Lycée Bergson, Paris

- 1** Si le mouvement était uniforme, les points seraient régulièrement espacés, puisque les étincelles ont lieu à intervalles de temps réguliers. Ce n'est pas le cas, donc le mouvement, bien que rectiligne (les points sont alignés), n'est pas uniforme.
- 2** Pour chaque couple de points consécutifs, on estime la vitesse en mesurant la distance séparant ces points et en la divisant par l'intervalle de temps qui les sépare, c'est-à-dire τ . Par exemple, pour les deux premiers points (les plus à gauche, que l'on notera 1 et 2), on mesure une distance $d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$, donc la vitesse correspondante est :

$$v_{1 \rightarrow 2} = \frac{0,020}{0,050} = 0,40 \text{ m.s}^{-1}.$$

La date correspondante est choisie comme étant la date moyenne entre les passages aux points 1 et 2, soit ici :

$$t_{12} = \frac{\tau + 2\tau}{2} = 1,5\tau = 0,075 \text{ s} = 75 \text{ ms}.$$

On répète cette opération pour tous les couples de points et on reporte le résultat des mesures dans le tableau ci-dessous.

couple de points	date moyenne (ms)	distance mesurée (cm)	vitesse instantanée (m.s^{-1})
(1,2)	75	2,0	0,40
(2,3)	125	1,8	0,36
(3,4)	175	1,6	0,32
(4,5)	225	1,4	0,28
(5,6)	275	1,2	0,24
(6,7)	325	1,0	0,20
(7,8)	375	0,8	0,16
(8,9)	425	0,6	0,12
(9,10)	475	0,4	0,08

Remarque : notons qu'il ne s'agit que d'estimations de la vitesse instantanée. Ce sont en fait des valeurs de vitesse moyenne sur de courts intervalles de temps, que l'on considère comme des approximations raisonnablement précises de la vitesse instantanée.

- 3 Ce graphe s'obtient en reportant en abscisse la deuxième colonne du tableau de la réponse précédente (la date) et en ordonnée la quatrième colonne de ce tableau (la vitesse). On obtient ainsi le graphe suivant :

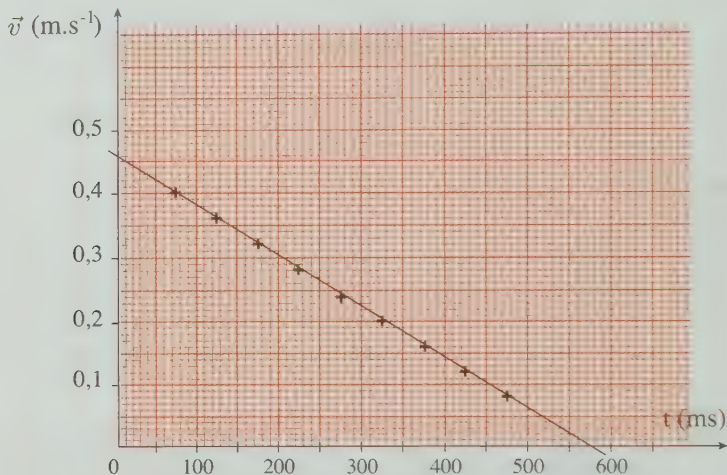


Figure 6.26 – Graphe de la vitesse en fonction du temps.

On constate que ce graphe est une droite ; la vitesse diminue donc régulièrement au cours du temps.

- 4 La réponse à la question précédente nous permet de déduire que l'énergie cinétique du mobile décroît au cours du temps.

16 Chronophotographie d'une bille

Enoncé
p. 155

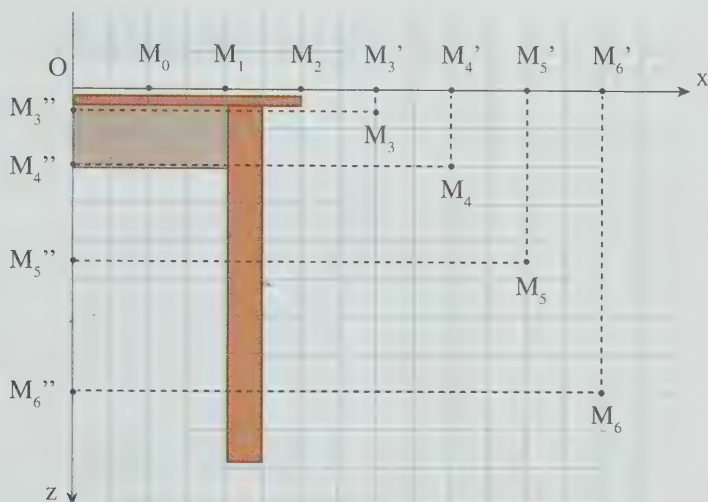
Lycée Lavoisier, Paris

- 1 (a) Les points M_0 et M_2 sont séparés par la distance $d = 2$ cm, ce qui correspond à une distance parcourue par la bille de $d' = 20 \times d$, soit $d' = 40$ cm. La vitesse moyenne de la bille pendant la première phase est donc :

$$v = \frac{d'}{2\tau} = \frac{40 \times 10^{-2}}{2 \times 0,1} = 2,0 \text{ m.s}^{-1}.$$

- (b) La distance séparant M_1 de M_0 est égale à celle séparant M_2 de M_1 , donc la bille a pendant cette phase une trajectoire rectiligne uniforme.

- 2 (a) On représente sur la figure ci-dessous les projetés orthogonaux M'_3 à M'_6 des points M_3 à M_6 sur l'axe (Ox) .



- (b) Les points projetés M'_3 à M'_6 ont un espacement constant, donc le mouvement projeté sur l'axe (Ox) est un mouvement rectiligne uniforme.
- (c) Sur la figure précédente, on a également représenté les projetés orthogonaux M''_3 à M''_6 des points M_3 à M_6 sur l'axe (Oz) .
- (d) Cette fois-ci, la distance séparant deux points M'' consécutifs n'est pas constante : elle augmente au cours du temps. Le mouvement selon l'axe (Oz) est un mouvement rectiligne accéléré.
- (e) Durant la phase 2, la seule force exercée sur la bille est son propre poids, vertical et dirigé vers le bas (on néglige la résistance de l'air).
- (f) Le poids n'ayant pas de composante horizontale, il est normal que la projection horizontale du mouvement soit un mouvement uniforme. De la même manière, le poids est dirigé, verticalement, dans le sens du mouvement. Il est donc normal que la projection verticale du mouvement soit un mouvement accéléré.

L'interaction gravitationnelle

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Interaction gravitationnelle entre deux masses ponctuelles
3. Poids d'un corps
4. Trajectoire d'un satellite

Thème : l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Jean Prévost, Montevilliers

Une masse de 1,0 kg pèse 20 N à la surface d'un astre à symétrie sphérique de rayon $R = 10\,000$ km. Quelle est la masse de cet astre ?

Donnée : constante de la gravitation : $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

Voir corrigé page 175

Ce chapitre aborde l'une des quatre interactions fondamentales de la physique : l'interaction gravitationnelle. Nous allons voir que le poids des objets sur Terre n'est autre que le résultat de leur interaction gravitationnelle avec la Terre, et nous allons étudier la trajectoire d'un projectile et d'un satellite.

2 Interaction gravitationnelle entre deux masses ponctuelles

On considère deux corps A et B, suffisamment petits pour que l'on puisse les considérer comme ponctuels. Les masses de ces corps sont respectivement m_A et m_B , et ils sont séparés par une distance d .

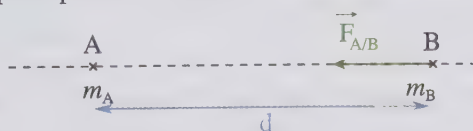


Figure 7.1 – Force exercée par la masse ponctuelle A sur la masse ponctuelle B.

Alors le corps A exerce sur le corps B une force $\vec{F}_{A/B}$, appelée force gravitationnelle, colinéaire au vecteur $\vec{AB}$, dirigée de B vers A, et de valeur :

$$F_{A/B} = \frac{\mathcal{G} \times m_A \times m_B}{d^2}.$$

Il s'agit d'une force exercée sans contact entre les masses A et B.

Dans cette expression, $\mathcal{G}$ est une constante, appelée constante de la gravitation universelle. Dans les unités du Système International, elle vaut :

$$\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ S.I.}$$

On en déduit immédiatement que la force exercée par B sur A est, en intervertissant les indices A et B.

➔ À RETENIR

$$F_{B/A} = \frac{\mathcal{G} \times m_B \times m_A}{d^2} = F_{A/B}$$

Nous retrouvons ainsi le principe de l'action-réaction, sur une force qui s'exerce à distance.

En outre, cette force est dirigée de A vers B, comme représenté sur la figure ci-dessous.

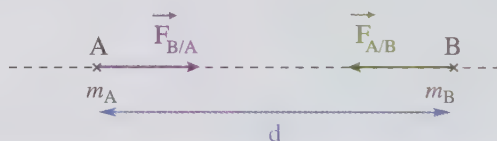


Figure 7.2 – Les deux forces sont de valeurs égales et de sens opposés.

L'expression de l'interaction gravitationnelle peut se résumer ainsi : « Entre deux corps massifs ponctuels, il existe une action à distance appelée force gravitationnelle, attractive et parallèle à la droite joignant les deux corps, dont la valeur est proportionnelle au produit des masses des deux corps et inversement proportionnelle au carré de leur distance. »

Exemple : il existe une interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune, entre la Terre et le Soleil, mais aussi entre la Lune et le Soleil, entre votre main droite et votre main gauche ou entre ce livre et vous. L'interaction gravitationnelle est universelle, en ce sens qu'elle intervient dans toute paire de corps de masse non nulle. Toutefois, elle est généralement beaucoup trop faible pour être détectable, et il faut des masses considérables pour qu'elle joue un rôle non négligeable. Ainsi, dans la vie quotidienne, la seule masse avec laquelle nous interagissons de manière notable est la Terre ; nous allons voir comment à la section suivante.

3 Poids d'un corps

3.1 Le poids est une manifestation de l'interaction gravitationnelle

Laissons tomber une bille sur Terre, que nous lâchons sans vitesse initiale. Le principe d'inertie nous dit que si la bille n'était soumise à aucune force, elle persévérerait dans son état de repos, puisqu'elle est initialement au repos. Ce n'est pas le cas : elle tombe. Elle est donc soumise à une force. Cette force est son poids, dont la direction est donnée par la trajectoire de la bille : il est vertical et dirigé vers le bas. En outre, nous savons que :

- Une fois lâchée, la bille n'est plus soumise qu'à son poids.
- La bille et la Terre sont en interaction gravitationnelle.

Par identification, nous pouvons en déduire que le poids est précisément la manifestation de l'interaction gravitationnelle entre un corps et la Terre, ou plus généralement entre un corps et l'astre sur lequel il se trouve.

3.2 Interaction gravitationnelle entre deux astres à symétrie sphérique

Entre deux astres à symétrie sphérique, l'interaction gravitationnelle a la même valeur que si les deux astres étaient ponctuels et toute leur masse était concentrée en leurs centres respectifs.

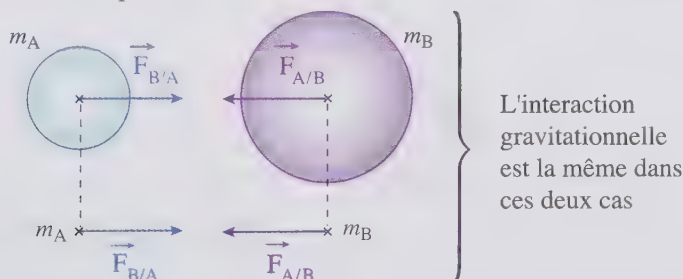


Figure 7.3 – Interaction gravitationnelle entre deux astres à symétrie sphérique.

Note : par symétrie sphérique, on entend que la densité dans l'astre étudié ne doit dépendre que de la distance au centre. L'astre peut ainsi être vu comme une structure en « pelures d'oignon », où chaque couche a une densité donnée.

3.3 Poids d'un corps à la surface d'un astre à symétrie sphérique

Lorsqu'on évalue la force gravitationnelle exercée par une répartition de masse à symétrie sphérique, tout se passe comme si la masse du corps était concentrée en son centre. Ainsi, la force que la Terre exerce sur une masse m située à sa surface a pour valeur :

$$P = \frac{G \times M \times m}{R^2},$$

où M et R sont respectivement la masse et le rayon de la Terre. On voit que cette formule est strictement identique à la formule de l'interaction entre deux masses ponctuelles, l'une étant à la distance R de la masse m , et ayant la masse de la Terre.

La force dans la formule ci-dessus est notée P puisqu'il s'agit précisément du poids de la masse m . Cette formule permet ainsi de calculer le poids d'un objet à la surface de n'importe quel astre à symétrie sphérique.

Par souci de simplification, on note g la constante $\mathcal{G} \times M/R^2$, où M est la masse de la Terre et R son rayon. Cette constante a pour valeur $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$. Elle est appelée intensité de la pesanteur. En vertu de la formule ci-dessus, on a, à la surface terrestre, la relation suivante entre la masse m d'un corps et son poids P :

$$P = m \times g.$$

Trajectoire d'un satellite

Extrapolation du mouvement de chute

Considérons un objet que l'on lâche d'une grande hauteur (disons 1 000 km pour fixer les idées), sur Terre, sans vitesse initiale. Il va tomber en ligne droite, comme indiqué ci-dessous.



Figure 7.4 – Chute libre sans vitesse initiale.

À présent communiquons-lui une vitesse initiale horizontale. Il va décrire une trajectoire incurvée comme représenté ci-après.



Figure 7.5 – Chute libre avec une vitesse horizontale initiale petite.

Si on augmente la vitesse initiale (horizontale), la trajectoire devient de plus en plus « ouverte », comme représenté ci-après.



Figure 7.6 – Chute libre avec une vitesse initiale horizontale importante.

Enfin, si la vitesse initiale atteint une valeur suffisante, la distance du corps en chute libre au centre de la Terre reste constante, et la trajectoire de chute libre est un cercle centré sur la Terre. Le corps est dit satellisé. Il est devenu un satellite de la Terre.

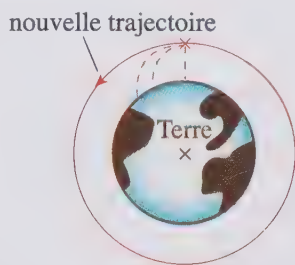


Figure 7.7 – Satellisation du projectile.

À moins d'exercer sur ce satellite une force autre que l'interaction gravitationnelle, ce mouvement de *révolution* autour de la Terre dure *ad vitam eternam*.

Solution de l'exercice typé

Lycée Jean Prévost, Montevilliers

D'après le cours, l'interaction gravitationnelle entre cette masse et l'astre à symétrie sphérique est donnée par :

$$F = \frac{G \times M \times m}{R^2},$$

où M est la masse de l'astre. On en déduit :

$$M = \frac{F \times R^2}{G \times m} = \frac{20 \times (10^4 \times 10^3)^2}{6,67 \times 10^{-11} \times 1,0} = 3,0 \times 10^{25} \text{ kg.}$$

Cette masse représente cinq fois la masse de la Terre.

Voir énoncé page 171

1 Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 181

- 1 Une planète A et une planète B ont exactement la même masse. Un même astronaute se sent « plus léger » sur la planète A. Laquelle des deux planètes (supposées à symétrie sphérique) a le plus grand diamètre ?
☐ a La planète A ☐ b La planète B
- 2 En l'absence de l'atmosphère (sans résistance de l'air), la trajectoire d'une balle de fusil, tirée horizontalement, est :
☐ a une parabole ☐ b une droite

2 Orbite basse



5 min

Corrigé
p. 181

Lycée d'Arsonval, Brive

Un satellite artificiel de la Terre décrit une orbite circulaire à l'altitude $h = 800$ km, en 1 h et 44,7 min.

- 1 Quelle est la vitesse de ce satellite ?
- 2 La durée de vie utile de ce satellite est de 15 ans. Combien d'orbites décrit-il pendant la totalité de sa mission ?

Données :
 • Le rayon de la Terre vaut $R = 6378$ km.
 • Le périmètre d'un cercle de rayon R vaut $2\pi R$.

3 Force gravitationnelle



10 min

Corrigé
p. 181

Lycée Pasteur, Neuilly

Calculer l'intensité de la force d'interaction gravitationnelle entre un rocher de masse $M = 20$ tonnes et un promeneur de masse $m = 60$ kg qui passe à $d = 30$ mètres du rocher.

Donnée : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

On considérera que le rocher et le promeneur sont tous deux équivalents à des masses ponctuelles égales à leurs masses respectives et situées en leurs centres de gravité respectifs.

4 Force de pesanteur sur une autre plan ★★

15 min

Corrigé
p. 182

Lycée Rabelais, Meudon

On considère un objet de masse m à la surface d'une planète sphérique, de rayon R et de masse M . L'intensité de la pesanteur à la surface de cette planète est g .

- 1 Exprimer le poids P de cet objet en fonction de m et g .

- 2 Exprimer l'intensité de la force gravitationnelle F que la planète exerce sur cet objet, en fonction de m , M , R et $\mathcal{G}$.
- 3 Quelle relation y a-t-il entre le poids et la force gravitationnelle ?
- 4 En déduire l'expression de g en fonction de $\mathcal{G}$, M et R .
- 5 Effectuer l'application numérique pour la Terre, puis pour Saturne.

Données :

- $M_{\text{Terre}} = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$.
- $R_{\text{Terre}} = 6\,400 \text{ km}$.
- $M_{\text{Saturne}} = 5,68 \times 10^{26} \text{ kg}$.
- $R_{\text{Saturne}} = 60\,268 \text{ km}$.
- $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

5 Force entre deux étoiles

★★

15 min

Corrigé
p. 183

Lycée Buffon, Paris

On considère une étoile double. Les deux étoiles composant cette étoile double ont respectivement les masses $M_1 = 2,5 M_S$ et $M_2 = 0,80 M_S$, où M_S est la masse du Soleil. Elles sont séparées par une distance $d = 0,12 \text{ U.A.}$ (unités astronomiques).

- 1 Quelle force, exprimée en newton, exerce l'étoile la plus massive sur la moins massive ?
- 2 Même question pour la force exercée par l'étoile la moins massive sur la plus massive.

Données :

- $1 \text{ U.A.} = 1,50 \times 10^8 \text{ km}$.
- $M_S = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$.
- $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

6 Poids sur différents astres

★★

10 min

Corrigé
p. 184

Lycée du Canada

Un homme « pèse » 70,0 kg sur Terre.

- 1 Pourquoi le mot « pèse » est-il entre guillemets dans la phrase ci-dessus ? Quelle serait une formulation correcte ?
- 2 Quel serait son poids sur Mars ? Sur la Lune ? On donnera également les masses correspondant sur Terre à ces poids.

- Données :
- Masse de la planète Mars : $M_{\text{Mars}} = 6,45 \times 10^{23} \text{ kg}$.
 - Rayon de la planète Mars : $R_{\text{Mars}} = 3\,388 \text{ km}$.
 - Masse de la Lune : $M_{\text{Lune}} = 7,37 \times 10^{22} \text{ kg}$.
 - Rayon de la Lune : $R_{\text{Lune}} = 1\,738 \text{ km}$.
 - Intensité de la pesanteur sur Terre : $g = 9,80 \text{ N.kg}^{-1}$.
 - Constante universelle de la gravitation :
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

7 Force entre le Soleil et la Terre

★★

15 min

Corrigé
p. 184

Lycée Les Fauvettes, Cannes

On considère le système Terre-Soleil.

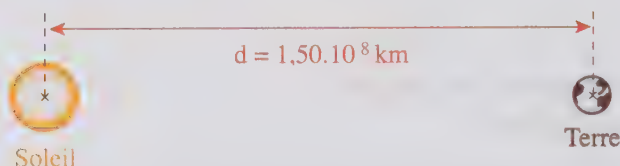


Figure 7.8 – Le système Terre-Soleil (l'échelle n'est pas respectée).

On suppose que la répartition de masse du Soleil et de la Terre est à symétrie sphérique.

- 1 Caractériser la force gravitationnelle $\vec{F}_1$ exercée par le Soleil sur la Terre.
- 2 Caractériser la force gravitationnelle $\vec{F}_2$ exercée par la Terre sur le Soleil.
- 3 Les représenter sur la figure de l'énoncé. On adoptera pour échelle 1 cm pour $2 \times 10^{22} \text{ N}$.

- Données :
- Masse de la Terre : $M_T = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$.
 - Masse du Soleil : $M_S = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$.
 - Constante universelle de la gravitation :
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

5 Boules de pétanque

★★

10 min

Corrigé
p. 185

Lycée Colbert, Lorient

On considère deux boules de pétanque de masse $m = 715 \text{ g}$, posées sur le sol, leurs centres respectifs se trouvant à une distance $d = 25 \text{ cm}$.

- 1 Quel est le poids de chaque boule ?
- 2 Calculer la valeur de la force d'interaction gravitationnelle F entre les deux boules.

- 3 Comparer cette force à leur poids.

Données : • $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$.
• $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

★★★

20 min

Corrigé
p. 185

Exoplanète CoRoT-7b

Lycée Descartes, Tours

En 2009, le satellite CoRoT a découvert autour d'une étoile de masse $0,93 \pm 0,03$ fois celle du Soleil, une planète, baptisée CoRoT-7b. Cette planète a une masse estimée à 0,0151 fois celle de Jupiter, et un rayon estimé à 0,15 fois celui de Jupiter.

- 1 Donner un encadrement de la masse de l'étoile, dans les unités du Système International.
- 2 Calculer la valeur de la force d'interaction gravitationnelle entre l'exoplanète et un objet de masse $m = 1 \text{ kg}$ situé à sa surface.
- 3 En déduire la valeur du champ de pesanteur à la surface de cette planète.

Données : • Masse du Soleil : $M_S = 2,00 \times 10^{30} \text{ kg}$.
• Masse de Jupiter : $M_J = 1,90 \times 10^{27} \text{ kg}$.
• Diamètre équatorial de Jupiter : $D_J = 142\,984 \text{ km}$.
• Constante de la gravitation : $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1}.\text{m}^3.\text{s}^{-2}$.

★★★

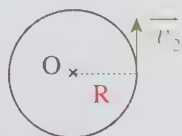
35 min

Corrigé
p. 186

10 Chute de la Lune sur la Terre

Lycée Stanislas, Paris

On se propose dans cet exercice de montrer comment on peut considérer que la Lune est perpétuellement en « chute libre » vers la Terre et de calculer de quelle distance d_1 elle « tombe » vers la Terre en une seconde. On suppose que l'orbite de la Lune est un cercle de rayon R et de centre O . La Terre est placée au point O .



- 1 Soit d la parcourue par la Lune en un intervalle de temps $\Delta t = 1 \text{ s}$. Exprimer la distance d en fonction de v_L , vitesse de la Lune sur son orbite, et de Δt .
- 2 Quelle serait la trajectoire de la Lune en l'absence de la Terre ?
- 3 Montrer que la distance D à laquelle la Lune se retrouve du point O au bout d'un temps Δt , en l'absence de la Terre, s'écrit : $D = \sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2}$.

Indication : on utilisera le théorème de Pythagore.

- 4 En fait, la Lune est toujours à la distance R de la Terre au bout d'un temps Δt puisqu'elle décrit une orbite circulaire. La distance dont elle est « tombée » vers la Terre par rapport à sa trajectoire non perturbée est donc : $d_1 = D - R$. Montrer que l'on peut écrire :

$$d_1 = \frac{v_L^2 \Delta t^2}{\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R}.$$

Indication : On évaluera $(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R)d_1$ et on écrira $d_1 = D - R$, puis on substituera D par l'expression obtenue plus haut. On devra utiliser l'identité remarquable :

$$(a - b)(a + b) = a^2 - b^2.$$

- 5 Effectuer l'application numérique.

- 6 Sur Terre, au bout d'un temps Δt , un corps initialement au repos tombe vers la Terre d'une distance $d_2 = 4,9$ m. Calculer le rapport $\frac{d_2}{d_1}$. Calculer également $\left(\frac{R}{r_T}\right)^2$, où r_T est le rayon de la Terre. Quelle remarque pouvez-vous faire ?

Données :

- Rayon de l'orbite lunaire : $R = 384\,400$ km.
- Vitesse de la Lune sur son orbite : $v_L = 1\,023$ m.s⁻¹.
- Rayon de la Terre : $r_T = 6\,378$ km.

1 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 176

- 1 a. Dans l'expression de l'interaction gravitationnelle, le numérateur est le même pour les deux planètes, donc le dénominateur doit être plus grand pour la planète A.
- 2 a. Il suffit, pour se convaincre que ce n'est pas une droite, de constater qu'elle finira toujours par retomber, sous l'action de son poids.

2 Orbite basse

➔ Enoncé
p. 176

Lycée d'Arsonval, Brive

- 1 Ce satellite décrit un cercle de rayon $R+h$, donc de périmètre $2\pi(R+h)$, en un temps $t = 3\,600 + 44,7 \times 60 = 6\,282$ s. Sa vitesse est donc donnée par :

$$v = \frac{2\pi(R+h)}{t} = \frac{2\pi \times (6\,378 + 800) \times 10^3}{6\,282} = 7,18 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}.$$

- 2 On note $T = 15$ ans la vie utile du satellite. Le nombre total d'orbites qu'il décrit est donné par :

$$N = \frac{T}{t}.$$

Il faut bien entendu exprimer T et t dans les mêmes unités. Nous convertissons donc T en secondes. Nous obtenons :

$$T = 15 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 4,7 \times 10^8 \text{ s}.$$

Le satellite effectue donc :

$$N = \frac{4,7 \times 10^8}{6\,282} \approx 75\,000 \text{ orbites}.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle est donnée la durée de la mission.

3 Force gravitationnelle

➔ Enoncé
p. 176

Lycée Pasteur, Neuilly

On représente la situation sur la figure page suivante.

On appelle $\vec{F}_{R/P}$ la force gravitationnelle exercée par le rocher sur le promeneur, et $\vec{F}_{P/R} = -\vec{F}_{R/P}$ la force exercée par le promeneur sur le rocher.

L'intensité de ces forces est donnée par :

$$F = F_{R/P} = F_{P/R} = \frac{G \times M \times m}{d^2}.$$

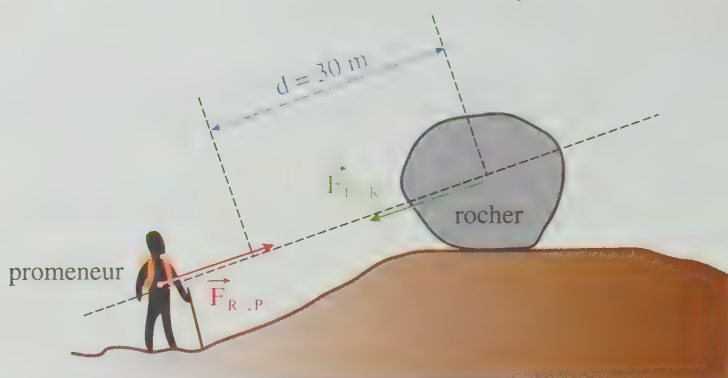


Figure 7.9 – La force exercée par le rocher sur le promeneur a même intensité, et sens contraire, à la force exercée par le promeneur sur le rocher.

Application numérique :

On convertit la masse du rocher dans l'unité de masse du Système International (puisque c'est dans ce système d'unités que la valeur de $\mathcal{G}$ nous est donnée), soit : $M = 2,0 \times 10^4$ kg.

$$F = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 2,0 \times 10^4 \times 60}{30^2} \approx 8,9 \times 10^{-8} \text{ N}.$$

Cette force est parfaitement négligeable devant le poids du promeneur ($P \approx 60 \times 10 = 600$ N). Le promeneur ne ressent donc pas cette attraction.



Force de pesanteur sur une autre planète

Enoncé
p. 176

Lycée Rabelais, Meudon

- 1 Le poids P de l'objet est simplement donné par : $P = mg$.
- 2 La force gravitationnelle que la planète exerce sur l'objet est donnée, d'après le cours, par :

$$F = \frac{\mathcal{G} \times M \times m}{R^2}.$$

- 3 Le poids de l'objet correspond précisément à la force gravitationnelle exercée sur lui par la planète. Donc $F = P$.
- 4 On peut donc écrire :

$$\begin{aligned} P &= m \times g \\ \text{et } P &= m \times \frac{\mathcal{G} \times M}{R^2}, \end{aligned}$$

d'où l'on déduit que l'on a :

$$g = \frac{\mathcal{G} \times M}{R^2}.$$

- 5 Pour la Terre, nous avons :

$$g = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 6,0 \times 10^{24}}{(6,4 \times 10^6)^2} \approx 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs compte-tenu des précisions de l'énoncé.

Pour Saturne, nous avons :

$$g = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,68 \times 10^{26}}{(6,027 \times 10^7)^2} \approx 10,4 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Ici nous pouvons garder trois chiffres significatifs.

On remarque que l'intensité de la pesanteur est comparable sur la Terre et sur Saturne.

5 Force entre deux étoiles

➔ Enoncé
p. 177

Lycée Buffon, Paris

- 1 La force exercée par l'étoile la plus massive sur la moins massive est égale à :

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{G \times M_1 \times M_2}{d^2}.$$

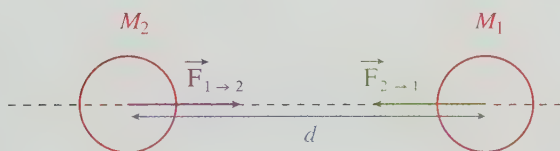


Figure 7.10 – Forces exercées par chaque étoile sur sa compagne.

Avant d'effectuer l'application numérique, convertissons toutes les grandeurs du problème aux unités du Système International. Nous obtenons :

$$\begin{aligned} M_1 &= 2,5 \times 2,0 \times 10^{30} = 5,0 \times 10^{30} \text{ kg} \\ M_2 &= 0,80 \times 2,0 \times 10^{30} = 1,6 \times 10^{30} \text{ kg} \\ d &= 0,12 \times 1,5 \times 10^8 \times 10^3 = 1,8 \times 10^{10} \text{ m} \end{aligned}$$

Nous avons donc :

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 5,0 \times 10^{30} \times 1,6 \times 10^{30}}{(1,8 \times 10^{10})^2} \approx 1,6 \times 10^{30} \text{ N}.$$

- 2 La force exercée par l'étoile la moins massive sur la plus massive a même intensité : $F_{1 \rightarrow 2} = F_{2 \rightarrow 1} \approx 1,6 \times 10^{30} \text{ N}.$

6 Poids sur différents astres

Enoncé
p. 177

Lycée du Canada

- 1 Le mot « pèse » signifie « a un poids de », et un poids est une force, qui s'exprime en newtons, et non une masse, qui s'exprime en kilogrammes. Une formulation correcte serait : « Un homme a une masse de 70,0 kg » ou « Un homme a sur Terre le poids qui est celui d'une masse de 70,0 kg ».
- 2 Son poids est l'intensité de l'interaction gravitationnelle entre l'homme et la planète, qui est donnée par :

$$P = F = \frac{G \times M \times m}{R^2}$$

où $m = 70,0$ kg est la masse de l'homme, M est la masse de la planète, G est la constante de la gravitation, et R est le rayon de la planète.

Dans le cas de Mars, l'application numérique donne :

$$P_1 = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 6,45 \times 10^{23} \times 70,0}{(3388 \times 10^3)^2} = 262 \text{ N.}$$

Ceci est sur Terre le poids d'une masse $m_1 = \frac{P_1}{g} \approx 27 \text{ kg}$.

Dans le cas de la Lune, l'application numérique donne :

$$P_2 = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 7,37 \times 10^{22} \times 70,0}{(1738 \times 10^3)^2} = 114 \text{ N.}$$

Ceci est sur Terre le poids d'une masse $m_1 = \frac{P_2}{g} \approx 12 \text{ kg}$.

Le poids de cet homme sur Terre est $P = mg = 686 \text{ N}$. On voit donc que l'on est 2,6 fois plus léger sur Mars et 6 fois plus léger sur la Lune (Attention ! On dit bien « plus léger », pas « moins massif » ; la masse reste la même).

7 Force entre le Soleil et la Terre

Enoncé
p. 178

Lycée Les Fauvettes, Cannes

L'interaction gravitationnelle entre le Soleil et la Terre a pour valeur :

$$F = \frac{G \times M_S \times M_T}{d^2}$$

où d est la distance Terre-Soleil.

L'application numérique donne :

$$F = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 2 \times 10^{30} \times 6 \times 10^{24}}{(150 \times 10^9)^2} \approx 3,6 \times 10^{22} \text{ N.}$$

- 1 La force gravitationnelle $\vec{F}_1$ exercée par le Soleil sur la Terre a pour valeur F (déterminée ci-dessus), et est dirigée de la Terre vers le Soleil.
- 2 La force gravitationnelle $\vec{F}_2$ exercée par la Terre sur le Soleil a pour valeur F (déterminée ci-dessus), et est dirigée du Soleil vers la Terre.

- 3 La longueur des flèches par lesquelles on représente les forces doit être : $\frac{3,6}{2} = 1,8$ cm. On en déduit le schéma suivant :



Figure 7.11 – La force exercée par le Soleil sur la Terre et la force exercée par la Terre sur le Soleil ont même valeur.

8 Boules de pétanque

➔ **Énoncé**
p. 178

Lycée Colbert, Lorient

- 1 Le poids de chaque boule est donné par :

$$P = m \times g = 0,715 \times 9,81 = 7,01 \text{ N.}$$

On garde trois chiffres significatifs compte-tenu de la précision des données de l'énoncé.

- 2 La valeur de la force d'interaction gravitationnelle entre les deux boules est donnée par :

$$F = \frac{G \times m \times m}{d^2} = \frac{G \times m^2}{d^2}.$$

L'application numérique donne (on veille à tout convertir au préalable dans les unités du Système International) :

$$F = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 0,715^2}{0,25^2} = 5,5 \times 10^{-10} \text{ N.}$$

On garde cette fois-ci deux chiffres significatifs, étant donnée la précision avec laquelle est donnée la distance entre le centre des deux boules.

- 3 Cette force est considérablement plus petite que leur poids. Plus précisément, nous avons :

$$\frac{F}{P} = 7,8 \times 10^{-11} \quad \text{ou encore} \quad \frac{P}{F} = 1,3 \times 10^{10}.$$

Le poids est treize milliards de fois plus grand que la force d'interaction gravitationnelle entre les boules.

5 Exoplanète CoRoT-7b

➔ **Énoncé**
p. 179

Lycée Descartes, Tours

- 1 La masse maximale de l'étoile hôte de CoRoT-7b est

$$M_{*}^{\max} = (0,93 + 0,03) \times M_{\text{S}} = 1,92 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

De la même manière, sa masse minimale est :

$$M_{*}^{\min} = (0,93 - 0,03) \times M_{\text{S}} = 1,80 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

La masse M_{*} de l'étoile obéit donc à l'encadrement suivant :

$$1,80 \times 10^{30} \text{ kg} < M_{*} < 1,92 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

- 2** La loi de la gravitation universelle indique que la force F recherchée est donnée par :

$$F = \frac{G \times M_p \times m}{R^2},$$

où M_p est la masse de la planète et R son rayon. On peut appliquer cette formule dans la mesure où l'on suppose que la répartition de la masse dans la planète est à symétrie sphérique. Avant d'effectuer l'application numérique, il nous faut convertir la masse et le rayon de la planète dans les unités du système international. Nous avons :

$$M_p = 0,0151 \times 1,90 \times 10^{27} = 2,87 \times 10^{25} \text{ kg}$$

et

$$R = \frac{0,15 \times 142\,984}{2} = 1,1 \times 10^4 \text{ km} = 1,1 \times 10^7 \text{ m}.$$

Compte-tenu du nombre de chiffres significatifs donnés dans l'énoncé, on garde trois chiffres significatifs pour la masse et deux pour le rayon. Nous sommes à présent en mesure d'effectuer l'application numérique :

$$F = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 2,87 \times 10^{25}}{(1,1 \times 10^7)^2} = 16 \text{ N}.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs, puisque c'est la précision avec laquelle est donné le rayon. Notons qu'ici on ne considère pas le nombre de chiffres significatifs avec lequel est donnée la masse m . Celle-ci est une masse arbitraire utilisée pour inférer, à la question suivante, la valeur du champ de pesanteur F/m . Le nombre de chiffres significatifs de m n'intervient pas dans le résultat final, et on obtiendrait un résultat de précision trop basse si l'on ne gardait qu'un chiffre significatif pour F . On peut considérer que cette masse est donnée avec une précision arbitrairement grande.

- 3** La valeur du champ de pesanteur s'en déduit par :

$$g_{\text{CoRoT-7b}} = 16 \text{ N.kg}^{-1}.$$

On retrouve bien, sur l'expression littérale du champ :

$$g = \frac{F}{m} = \frac{G \times M_p}{R^2},$$

que la valeur de la masse m n'intervient pas dans le résultat.

10 Chute de la Lune sur la Terre

Lycée Stanislas, Paris

➔ **Énoncé**
p. 179

- 1** La distance parcourue est simplement donnée par :

$$\text{distance} = \text{vitesse} \times \text{temps}$$

donc ici :

$$d = v_L \Delta t.$$

- 2** En l'absence de la Terre, la Lune ne serait soumise à aucune force et d'après le cours du chapitre précédent elle serait animée d'un mouvement rectiligne uniforme, et sa trajectoire serait une droite.

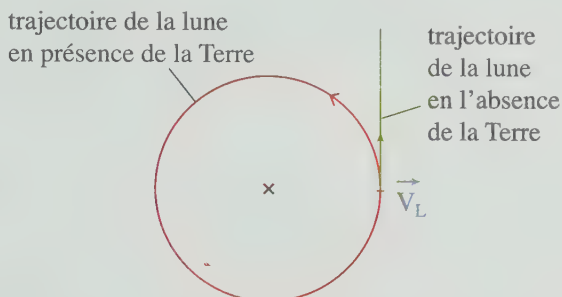


Figure 7.12 – Trajectoire de la Lune en présence et en l'absence de la Terre.

- 3** Soit L_1 la position initiale de la Lune, L_2 sa position au bout d'un temps Δt en l'absence de la Terre.

Le triangle OL_1L_2 est rectangle en L_1 donc on peut appliquer le théorème de Pythagore et écrire :

$$OL_2^2 = OL_1^2 + L_1L_2^2,$$

soit :

$$D^2 = R^2 + d^2 = R^2 + (v_L \Delta t)^2.$$

D'où l'on déduit :

$$D = \sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2}.$$

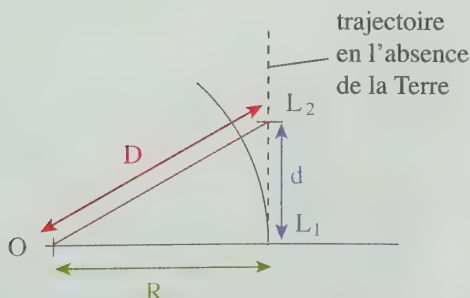


Figure 7.13 – En l'absence de la force gravitationnelle de la Terre, la Lune s'éloignerait de la Terre.

4 Commençons par évaluer :

$$\begin{aligned}
 \left(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R \right) d_1 &= \left(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R \right) (D - R) \\
 &= \left(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R \right) \left(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} - R \right) \\
 &= \left[\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} \right]^2 - R^2 \\
 &= R^2 + v_L^2 \Delta t^2 - R^2 = v_L^2 \Delta t^2
 \end{aligned}$$

On a donc :

$$\left(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R \right) d_1 = v_L^2 \Delta t^2,$$

d'où l'on déduit, en divisant chaque membre par $(\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R)$, l'égalité demandée dans l'énoncé, à savoir :

$$d_1 = \frac{v_L^2 \Delta t^2}{\sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} + R}.$$

5 Commençons par évaluer :

$$D = \sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2} = \sqrt{(384\,400 \times 10^3)^2 + 1\,023^2 \times 1^2} = 3,844 \times 10^8 \text{ m}.$$

On note que cette distance est égale au rayon de l'orbite lunaire à la précision de la calculatrice près. C'est pourquoi il a fallu effectuer la longue manipulation ci-dessus pour arriver malgré tout à évaluer la *toute petite distance* dont la Lune tombe sur la Terre en une seconde.

Nous pouvons à présent terminer l'application numérique :

$$d_1 = \frac{1\,023^2}{3,844 \times 10^8 + 3,844 \times 10^8} \approx 1,4 \times 10^{-3} \text{ m} = 1,4 \text{ mm}.$$

La Lune tombe de $d_1 = 1,4 \text{ mm}$ par seconde sur Terre.

6 On a :

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{4,9}{1,4 \times 10^{-3}} = 3\,500.$$

On ne précise pas d'unité car il s'agit d'un rapport de longueurs, donc d'un nombre sans dimension.

De la même manière, nous avons :

$$\left(\frac{R}{r_T} \right)^2 = \left(\frac{384\,400}{6\,378} \right)^2 \approx 60^2 = 3\,600.$$

Les deux nombres que nous venons d'évaluer sont sensiblement égaux. D'une certaine manière, un corps situé sur Terre tombe vers celle-ci (vers « le bas ») 3 500 fois « plus vite » qu'un corps (comme la Lune) situé au niveau de l'orbite lunaire. D'un autre côté, la Lune est située 60 fois plus loin que la surface terrestre du centre de la Terre, donc l'interaction gravitationnelle d'un corps au niveau de l'orbite de la Lune est $60^2 = 3\,600$ fois plus petite qu'à la surface de la Terre. On voit ici manifestement le lien entre interaction gravitationnelle et mouvement de chute (lié au poids).

Pression dans les gaz et les liquides

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Description d'un gaz à l'échelle microscopique
3. Notion de température
4. Notion de pression
5. Notion de gaz parfait
6. Loi de Boyle-Mariotte
7. Relation fondamentale de l'hydrostatique

Thèmes : la pratique du sport, l'Univers

1 Introduction

Exercice type 1

Lycée Van Dongen, Lagny

Un hublot d'avion a pour dimensions $25 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$. L'air à l'intérieur de l'avion est à la pression $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$, alors que l'air extérieur est à la pression $P_1 = 10^4 \text{ Pa}$. Quelle est la résultante des forces pressantes sur le hublot ?

Voir corrigé page 193

Dans ce chapitre, nous abordons l'étude des notions de température et de pression d'un gaz sur le plan microscopique et macroscopique, et nous présentons la relation fondamentale de l'hydrostatique.

2 Description d'un gaz à l'échelle microscopique

Un gaz tel que l'air contenu dans une salle de classe contient un nombre considérable de particules (ici des molécules de dioxygène et de diazote pour la plupart). Ces molécules sont animées, dans les conditions standards, d'une vitesse qui est de l'ordre de 500 m.s^{-1} , et ont des trajectoires totalement aléatoires, erratiques, qui sont perpétuellement changées par les chocs contre les parois et par les chocs entre particules elles-mêmes. Entre deux chocs les trajectoires sont des segments de droite. Pour fixer les idées, l'air dans la salle de classe se comporte comme un gigantesque billard, en trois dimensions au lieu de deux, avec environ 10^{25} boules, qui sont les molécules.

Le mouvement erratique, aléatoire, d'une particule dans un gaz est appelé le mouvement brownien.

Bien évidemment, il est impossible de décrire un gaz en étudiant individuellement la trajectoire de chacune des particules qui le composent. Il faut faire appel à des grandeurs macroscopiques, qui permettent une description statistique du gaz. Température et pression sont précisément des grandeurs macroscopiques qui jouent ce rôle.

Remarque : *macroscopique* est le contraire de *microscopique*. Une propriété macroscopique du système est ici une propriété que l'on peut définir de manière globale, sans s'intéresser à ses composants individuels, les particules, qui sont microscopiques.

3 Notion de température

La température caractérise l'état thermique d'un corps. Dans un gaz, elle est liée à la vitesse d'agitation moyenne des molécules. L'échelle de mesure des températures courantes est l'échelle Celsius. À la pression atmosphérique, l'eau gèle à 0 °C et bout à 100 °C. La dilatation d'un liquide tel que le mercure permet d'interpoler et d'extrapoler l'échelle au-delà de ces limites. Le symbole du degré Celsius est °C. Une température exprimée en degrés Celsius est souvent notée ϑ (lettre grecque *theta*).

4 Notion de pression

La température caractérisait la vitesse d'agitation des particules dans un gaz. La pression, elle, caractérise la « violence » de tous les chocs de particules subis par une paroi.

4.1 Force pressante subie par une surface

Un ballon gonflé est gonflé précisément parce que les molécules qui s'agitent à l'intérieur viennent heurter ses parois à l'intérieur.

De manière plus formelle, lorsqu'une surface plane est plongée dans un fluide (liquide ou gaz), elle reçoit de ce fluide une force, appelée force pressante, qui est perpendiculaire à la surface et proportionnelle à celle-ci.

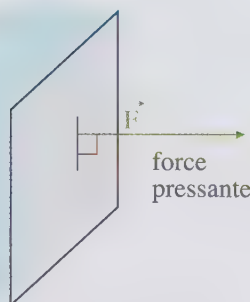


Figure 8.1 – La force pressante est perpendiculaire à la surface. La force est exercée par un fluide qui se trouve à gauche de la surface.

Bien évidemment, si cette surface est en contact avec le fluide des deux côtés, elle reçoit deux forces pressantes qui se compensent. En revanche, si elle est en contact avec des fluides différents des deux côtés (vitre d'aquarium, hublot d'avion, hublot de sous-marin, etc.) alors les forces pressantes ne se compensent plus.

Définition 1

La pression est la force exercée par unité de surface.

Si on note P la pression, elle est donc donnée par :

$$P = \frac{F}{S},$$

où F est la force pressante exercée par le fluide sur une surface plane d'aire S .

4.2 Unités et mesure

Dans les unités du Système International, elle se mesure donc en N.m^{-2} , encore appelé pascal, de symbole Pa. On utilise souvent l'hecto-pascal, de symbole hPa. On a : $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$.

La pression standard est $P_0 = 101\,325 \text{ Pa} = 1\,013,25 \text{ hPa}$.

Remarque : d'autres unités fréquemment utilisées sont :

- L'atmosphère, de symbole atm. On a : $1 \text{ atm} = P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$.

Exemple : une pression $p = 3 \text{ atm}$ vaut, en pascals :

$$p = 3 \times 101\,325 = 303\,975 \text{ Pa}.$$

- Le millimètre de mercure (de symbole mm Hg, voir ci-dessous).

Une pression se mesure à l'aide d'un manomètre.

Le dispositif conceptuellement le plus simple pour mesurer une pression consiste en un tube contenant du mercure retourné sur une cuve. La force pressante de l'air à la surface du mercure contenu dans la cuve fait monter le mercure dans le tube retourné (il n'y a aucune force pressante à la surface du ménisque pour compenser, puisque le tube ne contient pas d'air). À la pression standard, le dénivelé de mercure est exactement de 760 mm. La pression standard vaut donc $P_0 = 760 \text{ mm Hg}$.

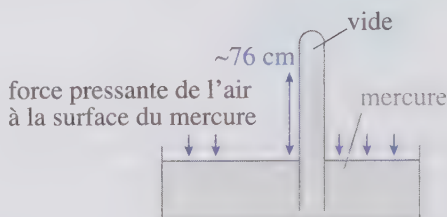


Figure 8.2 – Principe du manomètre à mercure.

Il existe toutefois de nombreux autres dispositifs pour mesurer la pression. Ceux fondés sur la hauteur d'une colonne de liquide, comme dans l'exemple ci-dessus, ou fondés sur la différence de hauteur de la surface du liquide dans un tube en U ont été conçus il y a plusieurs siècles. On peut également mesurer la pression à l'aide d'un *manomètre mécanique*. Ce type d'appareil ne contient pas de liquide, et est basé sur la déformation d'une pièce métallique sous l'effet de la pression à laquelle elle est soumise.

Dans le cas particulier où un dispositif de mesure de pression est spécifiquement conçu pour mesurer la pression atmosphérique, il est appelé *baromètre*.

Notion de gaz parfait

L'hypothèse « gaz parfait » regroupe les conditions suivantes :

- Les particules constitutives du gaz (atomes ou molécules) peuvent être assimilées à des masses ponctuelles.
- Ces particules n'interagissent pas entre elles (ni action à distance, ni chocs).
- La pression du gaz est liée aux chocs sur les parois, et chaque particule a une trajectoire rectiligne uniforme entre deux chocs sur les parois.

La plupart des gaz, dans les conditions usuelles, se comportent presque de manière « idéale », c'est-à-dire comme des gaz parfaits. Toutefois, pour que les particules « s'ignorent » comme requis par la deuxième hypothèse, il faut que la distance moyenne qui les sépare soit beaucoup plus grande que leur dimension, donc il faut que le gaz soit suffisamment dilué.

ATTENTION

Le modèle de gaz parfait est valable pour les gaz dilués et de faible pression.

L'air qui nous entoure peut être avec une très bonne approximation considéré comme un gaz parfait.

➔ À RETENIR

À température et pression donnés, le volume occupé par une quantité de matière donnée d'un gaz parfait est indépendant de la nature du gaz.

6 Loi de Boyle-Mariotte

L'irlandais Robert Boyle et le Français Edme Mariotte ont, au cours du XVII^e siècle, découvert indépendamment la loi qui porte leur nom, et qui peut s'énoncer ainsi :

➔ À RETENIR

À température donnée, le produit de la pression P et du volume V d'une quantité de gaz donnée est constante : $P \times V = \text{constante}$.

Cette loi est très bien vérifiée par les gaz aux basses pressions (pressions de l'ordre de la pression atmosphérique). Elle est rigoureusement exacte dans le cas des gaz parfaits. Elle est indépendante de la nature (composition chimique) du gaz considéré. On pouvait s'y attendre dans la mesure où la première hypothèse des gaz parfaits suppose que les particules du gaz parfait sont des masses ponctuelles, et donc ne considère absolument pas la structure atomique ou moléculaire (c'est-à-dire l'identité chimique) des particules du gaz.

Ainsi, considérons un gaz à une température donnée ϑ , dans une enceinte de volume V_1 et à la pression P_1 . On suppose que l'on fait varier le volume de l'enceinte, de manière à ce qu'il devienne V_2 . Si la température est maintenue égale à ϑ , alors le gaz se retrouve à une pression P_2 qui vérifie l'égalité :

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2.$$

Nous verrons dans les classes ultérieures que ce produit dépend de la température (raison pour laquelle il est très important de spécifier « à température constante » dans l'énoncé de la loi de Boyle-Mariotte). Ceci nous conduira à l'équation d'état des gaz parfaits.

➔ Solution de l'exercice type 1

Lycée Van Dongen, Lagny

On commence par évaluer la force pressante F_i sur la face intérieure du hublot. Cette force est donnée par :

$$F_i = S \times P_0 ,$$

➔ Solution de l'exercice type 1 (suite)

Lycée Van Dongen, Lagny

où $S = 0,25 \times 0,18 = 0,045 \text{ m}^2$ (attention à travailler dans les unités du Système International).

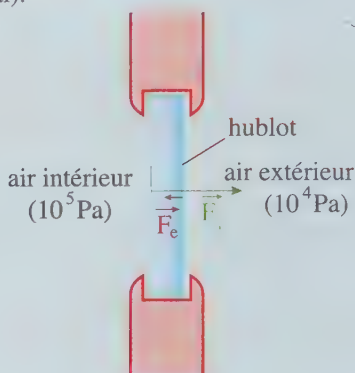


Figure 8.3 – Bilan des forces pressantes sur le hublot d'avion.

L'application numérique donne :

$$F_i = 10^5 \times 0,045 = 4\,500 \text{ N.}$$

De la même manière, la force pressante F_e sur la face extérieure du hublot est :

$$F_e = P_1 \times S = 10^4 \times 0,045 = 450 \text{ N.}$$

La résultante de ces deux forces, qui sont parallèles et opposées, est une force dirigée vers l'extérieur de l'avion et de valeur :

$$F = F_i - F_e = 4\,500 - 450 = 4\,050 \text{ N.}$$

Voir énoncé page 189

7 Relation fondamentale de l'hydrostatique

Exercice type 2

Lycée Victor Hugo, Bordeaux

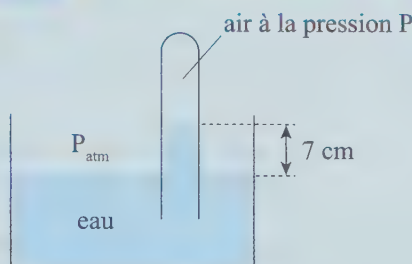
On considère la situation représentée page suivante. Un tube à essais est renversé sur une cuve contenant de l'eau. On observe un dénivelé h entre le niveau de l'eau dans la cuve et celui de l'eau dans le tube à essais.

Quelle est, dans les unités du Système International, la pression P de l'air emprisonné dans le tube à essais ?

- Données :
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.
 - Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$.
 - Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$.

Exercice type 2 (suite)

Lycée Victor Hugo, Bordeaux



Voir corrigé page 196

Définition 2

On appelle masse volumique d'un corps la masse par unité de volume de ce corps. Dans les unités du Système International, elle s'exprime en kilogramme par mètre cube ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

En unités du Système International, la masse volumique est donc la masse d'un mètre cube du corps.

Dans un liquide incompressible de masse volumique ρ , au repos, on a, entre deux points quelconques A et B à l'intérieur du liquide la relation donnée ci-dessous :

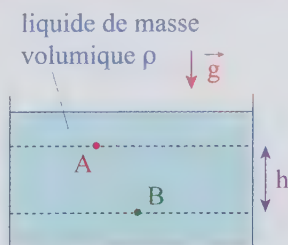
À RETENIR

Relation fondamentale de l'hydrostatique :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times h,$$

où P_B est la pression au point B et P_A la pression au point A, g l'intensité de la pesanteur, ρ la masse volumique du fluide et h la différence d'altitude entre les deux points.

On représente schématiquement la situation à la figure ci-dessous.



La relation fondamentale de l'hydrostatique appelle quelques commentaires :

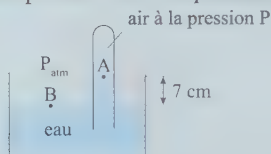
- Elle n'est valable que si le liquide est au repos (d'où le qualificatif de loi de l'hydrostatique).
- La pression est toujours plus élevée au point le plus bas (dans le cas représenté ci-dessus il s'agit du point B). En cas de doute en cours de devoir, on s'assurera bien que chaque membre de l'égalité est positif (ici $P_B > P_A$ donc $P_B - P_A > 0$, et $\rho \times g \times h > 0$).

- h n'est pas la distance qui sépare les points, mais la différence d'altitude. En particulier, si ceux-ci sont à la même altitude, ils sont à la même pression.
- Les points A et B ne sont pas nécessairement sur la même verticale (voir à ce titre la correction de l'exercice type).
- On peut appliquer la relation fondamentale de l'hydrostatique si on peut passer continûment du point A au point B en restant toujours dans le même fluide.

➤ Solution de l'exercice type 2

Lycée Victor Hugo, Bordeaux

Nous considérons les deux points A et B représentés sur la figure ci-dessous.



La différence d'altitude entre ces deux points est $h = 7$ cm. Nous pouvons écrire la relation fondamentale de l'hydrostatique relative à ces points :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times h.$$

Or, la pression au point B, qui se trouve à la surface libre de la cuve, au contact de l'atmosphère, est la pression atmosphérique :

$$P_B = P_{\text{atm}}.$$

De la même manière, la pression au point A, en contact avec l'air emprisonné dans le tube à essais, vérifie :

$$P_A = P.$$

Nous pouvons donc réécrire la relation fondamentale de l'hydrostatique comme :

$$P_{\text{atm}} - P = \rho \times g \times h \quad \text{soit :} \quad P = P_{\text{atm}} - \rho \times g \times h.$$

Nous effectuons à présent l'application numérique, après avoir dûment converti toutes les grandeurs dans les unités du Système International.

Combien devons-nous laisser de chiffres significatifs à ce résultat ? Notons que la hauteur d'eau dans le tube à essais n'est donnée qu'avec un chiffre significatif, donc la *différence* de pression ρgh , qui est une petite quantité (P diffère peu de P_{atm} , comme nous allons le voir), n'est connue qu'avec un chiffre significatif. Ainsi :

$$\rho gh = 10^3 \times 9,8 \times 0,07 = 7 \times 10^2 \text{ Pa}$$

Le dernier chiffre significatif est donc celui des centaines de pascals. Par conséquent :

$$P = 101\,325 - 7 \times 10^2 = 1,006 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

Le chiffre des centaines de pascals est le quatrième et dernier chiffre significatif.

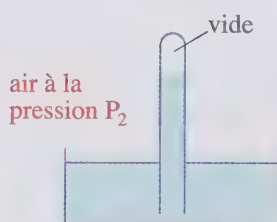
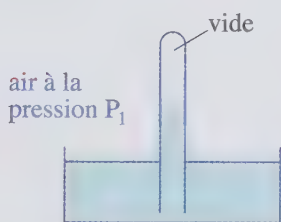
Voir énoncé page 194

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 209

- 1 Sans calcul, identifier la seule pression des quatre ci-dessous qui vaut 3 atm. On rappelle que la pression atmosphérique vaut approximativement 10^5 Pa, ou 760 millimètres de mercure.
 [a] 76 mm Hg [b] 760 mm Hg [c] 4 000 hPa [d] 2 280 mm Hg
- 2 Lorsque, à température constante, le volume d'un gaz augmente, sa pression
 [a] diminue [b] augmente
- 3 Le protocole expérimental est strictement identique dans les expériences schématisées ci-dessous.



Que peut-on en déduire ?

- [a] $P_1 = P_2$ [b] $P_1 < P_2$ [c] $P_1 > P_2$

2 Pression sur un piston

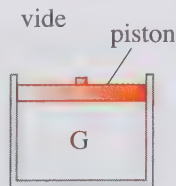


10 min

Corrigé
p. 209

Lycée Les Fauvettes, Cannes

On considère un gaz G dans une enceinte fermée en haut par un piston de masse $m = 10$ kg et de surface $S = 50$ cm². L'enceinte se trouve dans le vide, comme indiqué sur la figure ci-dessous.



- 1 Quel est le bilan des forces exercées sur le piston ?
- 2 En déduire la pression du gaz G.

Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 10$ N.kg⁻¹.

Forces pressantes sur une fenêtre



5 min

Corrigé
p. 209

Lycée Frédéric Ozanam, Lille

- 1 Quelle est la force exercée sur une fenêtre de $80 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ par l'air extérieur, de pression $P = 101\,325 \text{ Pa}$?
- 2 Quelle est la force exercée par l'air intérieur, supposé à la même pression que l'air extérieur ?
- 3 Pourquoi la fenêtre ne casse-t-elle pas ?

Bouteille d'oxygène



15 min

Corrigé
p. 210

Lycée Carnot, Dijon

On considère une bouteille d'oxygène destinée à la plongée. Elle contient de l'oxygène sous une pression de 6 bars. Le rayon de cette bouteille est $r = 5 \text{ cm}$.

- 1 La bouteille est hors de l'eau. Calculer la force pressante due à l'air ambiant sur le fond de la bouteille.
- 2 Calculer la force pressante due à l'oxygène contenu dans la bouteille, sur le fond de celle-ci.
- 3 En déduire le bilan des forces pressantes sur le fond de la bouteille lorsqu'elle est hors de l'eau.
- 4 Quelle est la force pressante due à l'eau, sur le fond de la bouteille, lorsque celle-ci se trouve à 50 mètres de profondeur ?
- 5 En déduire le bilan des forces pressantes sur le fond de la bouteille, à cette profondeur.
- 6 Même chose à 100 mètres de profondeur.

Données :

- Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.
- Pression de l'air ambiant : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

Pointe de punaise



10 min

Corrigé
p. 212

Lycée Henri IV, Paris

On considère une punaise en laiton (représentée ci-dessous), composée d'une pointe dont l'extrémité peut être considérée comme un disque de rayon $r = 0,1 \text{ mm}$, et d'une tête plate assimilable à un disque de rayon $R = 4 \text{ mm}$. On exerce sur la tête de la punaise une force de valeur $F = 50 \text{ N}$, tout en appliquant la pointe sur un mur.

- 1 Quelle masse aurait un poids de valeur égale à cette force ?
- 2 Quelle pression exerce-t-on sur la tête de la punaise ?
- 3 Quelle pression est exercée sur la pointe ? Que pouvez-vous en conclure ?

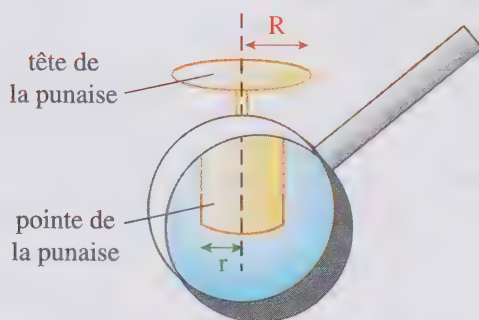


Figure 8.4 – Schéma de la punaise et agrandissement de la pointe.

- Données :
- La surface d'un disque de rayon r est πr^2 .
 - Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

Force pressante

★★

10 min

Corrigé
p. 212

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

Une masse $m = 240 \text{ kg}$ est posée sur une surface d'aire $A_1 = 3 \text{ m}^2$.

- 1 Quelle pression, supposée uniformément répartie, exerce-t-elle sur cette surface ?
- 2 Cette pression est-elle beaucoup plus grande que la pression atmosphérique ?
- 3 Cette masse est à présent posée sur une surface d'aire $A_2 = 120 \text{ cm}^2$. Quelle est la pression exercée sur cette surface ? Comment se compare-t-elle à la pression atmosphérique ?

Donnée : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

Mobile autoporteur

★★

10 min

Corrigé
p. 213

Lycée Madeleine Danielou, Rueil-Malmaison

Un mobile autoporteur cylindrique, de rayon $R = 5 \text{ cm}$ et de masse $m = 400 \text{ g}$, se déplace sur un coussin d'air sur un plan horizontal, et sa trajectoire est rectiligne et uniforme.

- 1 Nommer et calculer les forces exercées sur le mobile ? (on supposera que, exception faite du coussin d'air sur sa face inférieure, il se trouve dans de l'air à la pression standard $P_0 = 101\,325 \text{ Pa}$).
- 2 En déduire la pression du coussin d'air sur la face inférieure.

Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

Remarque : il faut auparavant avoir étudié le chapitre sur le principe d'inertie pour résoudre cet exercice.

8 Ballons de baudruche

★★

5 min

Corrigé
p. 214

Lycée Sévigné, Marseille

Deux ballons de baudruche identiques sont gonflés avec deux gaz différents, respectivement de l'hélium et du dioxygène, avec des pressions identiques. Les deux ballons ont donc une forme et un volume identiques au départ. Il sont soigneusement ficelés, et pourtant il se dégonflent au bout de quelques jours. On remarque que le ballon gonflé d'hélium se dégonfle plus rapidement que l'autre.

- 1 Quelle est la nature microscopique des forces pressantes agissant à l'intérieur des ballons ?
- 2 Comment interpréter le fait que les ballons se dégonflent ?
- 3 Quel renseignement peut-on en déduire concernant la taille relative d'une molécule de dioxygène et d'un atome d'hélium ?

9 Calcul de pression

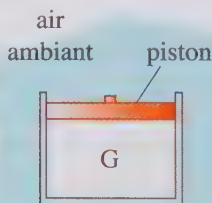
★★

10 min

Corrigé
p. 215

Lycée Ampère, Lyon

On considère le gaz G dans l'enceinte de la figure ci-dessous. Cette enceinte est fermée par un piston de masse m et de surface $S = 100 \text{ cm}^2$. L'ensemble est en équilibre, et se trouve dans l'air ambiant ($P = 101\,325 \text{ Pa}$).



- 1 Quelles sont les forces exercées sur le piston ? Caractériser chacune d'elle.
- 2 Sachant que la pression du gaz G est $P_G = 1,11 \times 10^5 \text{ Pa}$, déduire la masse du piston.

Donnée : intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

10 Unité de pression

★★

10 min

Corrigé
p. 215

Lycée Carnot, Dijon

Un fabricant automobile désire spécifier la pression nominale des pneumatiques d'une automobile. Dans le manuel de celle-ci réservé aux pays anglo-saxons, on trouve l'indication, pour les roues avant : 32 PSI. Ce dernier sigle est une unité de pression qui correspond à *Pound per Square Inch* (livre par pouce carré).

- 1 Cette unité de pression utilise un abus de langage très répandu. Lequel ?
- 2 Quelle est, dans les unités du Système International, la surface S correspondant à un pouce carré ?
- 3 Quelle est le poids d'une masse d'une livre ?
- 4 Quelle est, en pascals, la pression correspondant à 1 PSI ?
- 5 Quelle indication le fabricant de voitures doit-il donner dans le manuel destiné aux pays où les pressions de pneumatiques s'expriment couramment en bars ?

Données :

- Une livre vaut 0,453 592 37 kg.
- L'intensité de la pesanteur vaut $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$.
- Un pouce mesure 25,4 mm.
- Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$.

11 Plongeur en apnée

★★

10 min

Corrigé
p. 216

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

On considère un athlète effectuant une descente en apnée jusqu'à une profondeur $h = 32 \text{ m}$. Il prend son inspiration à la surface juste avant son plongeon. L'air contenu dans ses poumons occupe alors un volume $v_0 = 5,0 \text{ L}$.

- 1 Quelle est la pression de l'eau au point le plus profond de sa descente ?
- 2 En déduire le volume occupé par l'air dans ses poumons lorsqu'il atteint ce point.

Données :

- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \text{ g.cm}^{-3}$.
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.
- Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 101\,325 \text{ Pa}$.

12 Étude d'une seringue

★★

10 min

Corrigé
p. 217

Lycée Ampère, Lyon

On souhaite comprimer une seringue dont on bouche l'extrémité avec le doigt. Initialement, le piston est à $l = 10 \text{ cm}$ du fond. On souhaite l'amener à $l' = 2 \text{ cm}$ du fond. Pour ce faire, on pousse lentement sur le piston. La seringue et l'air qu'elle contient peuvent donc être considérés comme étant à tout instant en équilibre thermique.

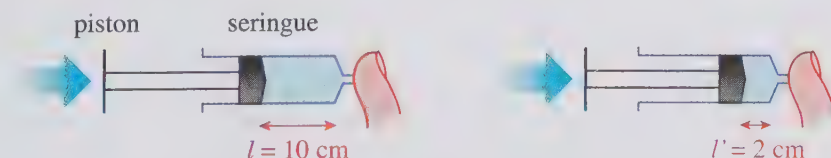


Figure 8.5 – Compression de l'air emprisonné dans la seringue.

Quelle force F_0 l'opérateur doit-il exercer sur le piston ?

Donnée : le rayon de la seringue est $r = 5 \text{ mm}$.

13 Calculs de pression

★★

10 min

Corrigé
p. 218

Lycée Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

On considère un système formé de deux bouteilles A et B identiques indéformables reliées par un conduit, sur lequel se trouve un robinet, comme indiqué sur la figure ci-dessous.

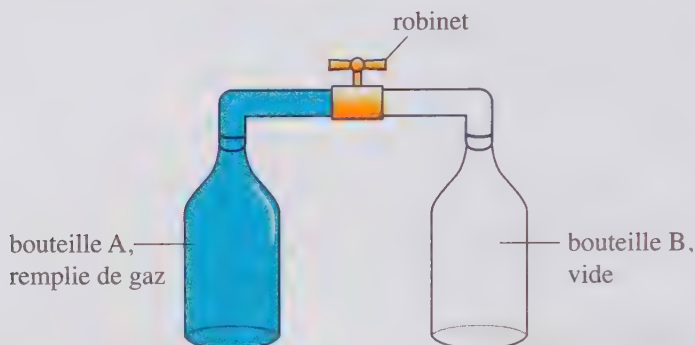


Figure 8.6 – Les deux bouteilles sont de forme identique.

Initialement, la bouteille A contient un gaz à la pression $P_A = 1.5 \times 10^5$ Pa, et la bouteille B est vide.

- 1 On ouvre le robinet. Que se passe-t-il ? Quelle est la pression du gaz dans les deux bouteilles ?
- 2 On referme alors le robinet, on fait le vide dans la bouteille A, puis on rouvre le robinet. Quelle est la nouvelle pression du gaz ?

Indication :

On admet que le gaz contenu dans les bouteilles se comporte comme un gaz parfait. La température de ce gaz est fixée tout au long de l'expérience.

14 Profil de plongée

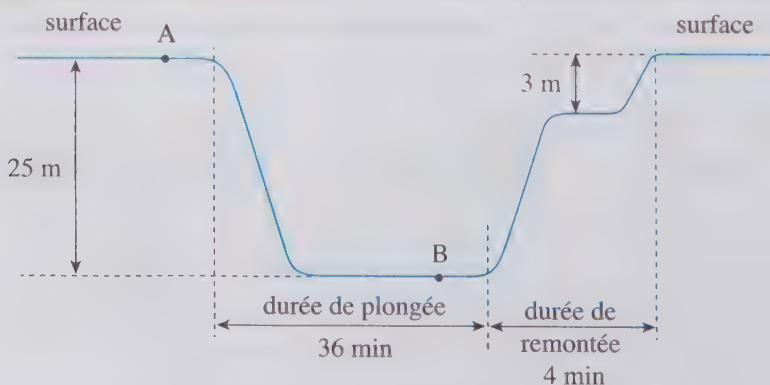
★★

15 min

Corrigé
p. 219

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

Un plongeur prépare son immersion par l'étude du profil de plongée suivant :



On suppose que la température est constante au cours de la plongée.

- 1 Quelle est la durée totale Δt de la plongée, incluant la remontée ?
- 2 Quelle est la pression P_A au point A ? Justifier.
- 3 La différence de pression ΔP entre deux points d'un liquide est proportionnelle à la différence de profondeur Δh entre ces deux points. Le coefficient de proportionnalité est $k = 1,0 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$.
 - (a) Quelle est la pression P_B exercée sur le plongeur lorsqu'il se trouve à la profondeur maximale ?
 - (b) La paume du plongeur a une surface $S = 30 \text{ cm}^2$. Quelle est la valeur F de la force pressante $\vec{F}$ subie par la paume du plongeur à cette profondeur ?
 - (c) En admettant que la quantité d'air contenue dans les poumons ne varie pas, quel est le volume de l'air contenu dans ses poumons à cette profondeur sachant qu'en surface il occupe $V_A = 7,5 \text{ L}$?

Donnée : la pression atmosphérique vaut $P_{\text{atm}} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$.

15 Lunettes de plongée



15 min

Corrigé
p. 219

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

On considère des lunettes de plongée constituées d'un joint en caoutchouc, de deux verres circulaires de diamètre 5 cm, et d'une attache.



- 1 Quelle est l'aire totale des verres de ces lunettes ?
- 2 Quelle est la force pressante totale exercée par l'air sur le côté externe des verres, au niveau de la mer, avant la plongée ?
- 3 Quelle est la force pressante totale exercée par l'air sur le côté interne des verres, au niveau de la mer, avant la plongée ?
- 4 Quelle est la force pressante exercée par l'eau sur le côté externe des verres, à la profondeur $d = 5 \text{ m}$?

Données :

- Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$.
- Valeur du champ de pesanteur terrestre : $g = 10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

16 Densité d'une huile

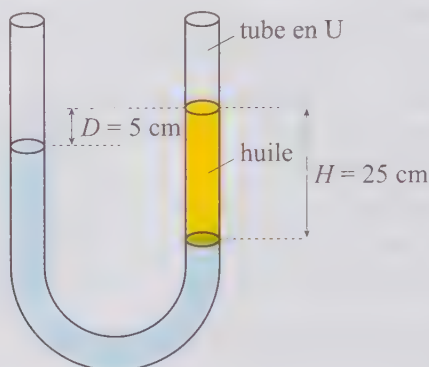


25 min

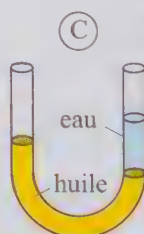
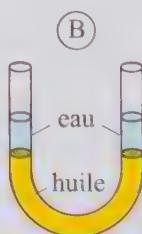
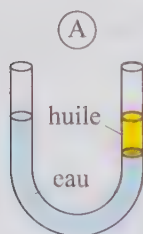
Corrigé
p. 220

Lycée Condorcet, Paris

On souhaite mesurer la densité par rapport à l'eau d'une huile de cuisine. Pour ce faire, on introduit de l'eau dans un tube en U, puis, d'un seul côté, l'huile dont on souhaite mesurer la densité d . Une fois l'équilibre atteint, on observe la situation représentée ci-dessous.



- 1 Quelle propriété de l'huile et de l'eau permet d'expliquer leur séparation ?
- 2 Justifier qualitativement pourquoi la densité de l'huile par rapport à l'eau est inférieure à un.
- 3 En utilisant la relation fondamentale de l'hydrostatique, exprimer la densité d en fonction de la hauteur de H de l'huile dans la partie droite et du dénivelé D entre le ménisque d'eau et celui d'huile. Faire l'application numérique.
- 4 Si l'on introduit à présent une huile plus dense que l'eau, quelle(s) configuration(s) peut-on obtenir parmi les trois représentées ci-dessous, une fois l'équilibre atteint ?



17 Planète océan

★★

20 min

Corrigé
p. 221

Lycée du Parc, Lyon

Au cours des années 2000, il a été proposé le concept de « planète océan ». Il s'agirait de grosses planètes telluriques entièrement recouvertes d'une couche d'eau liquide pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de profondeur. On considère une telle planète, ayant une masse égale à 10 fois celle de la Terre, et un rayon égal à 2,0 fois celui de la Terre.

- 1 Quelle est la valeur du champ de pesanteur à la surface de cette planète ?
- 2 Quelle est la pression à 70 km de profondeur dans l'océan qui recouvre cette planète ? On supposera négligeable la pression à la base d'une éventuelle atmosphère qui recouvre la planète.

Données :

- Masse de la Terre : $5,98 \times 10^{24}$ kg.
- Rayon de la Terre : 6378 km.
- Masse volumique de l'eau liquide : 10^3 kg.m⁻³.
- Constante de la gravitation : $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N.kg⁻².m².

Remarque : il faut avoir préalablement étudié le chapitre sur la gravitation pour répondre à cet exercice.

18 Calcul de pression

★★

15 min

Corrigé
p. 222

Lycée de la Providence, La Rochelle

Deux enceintes indéformables (1) et (2) sont maintenues à la température $\vartheta = 100$ °C en permanence. À l'instant initial, l'enceinte (1) contient un gaz sous une pression $p_1 = 3,0$ atm ; le volume de cette enceinte est $V_1 = 1,0$ m³. L'enceinte (2) contient quant à elle, est vide, et son volume est $V_2 = 2,0$ m³.

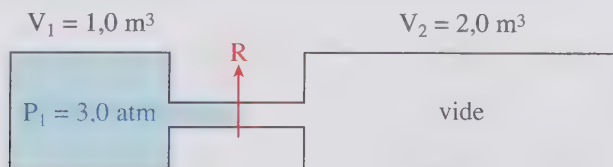


Figure 8.7 – Représentation schématiques des enceintes (1) et (2).

On ouvre le robinet R et les molécules du gaz peuvent librement circuler entre les enceintes (1) et (2) : la pression est alors la même dans les deux enceintes. Que vaut cette pression ?

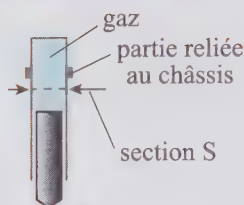
19 Amortisseur

★★★

10 min

Corrigé
p. 222

Lycée Blomet, Paris



Un amortisseur de véhicule contient un gaz comprimé, comme indiqué sur la figure ci-contre. La section S de chaque amortisseur est $S = 5 \text{ cm}^2$. La masse du véhicule est $m = 500 \text{ kg}$. Il comporte quatre roues, sur lesquelles son poids est également réparti. Quelle est la pression du gaz dans chaque amortisseur ?

Données : • Intensité de la pesanteur : $g = 10 \text{ N.kg}^{-1}$.

20 Enceinte indilatable

★★★

10 min

Corrigé
p. 223

Lycée Sainte-Geneviève, Versailles

On enferme une certaine quantité de gaz dans un réservoir de volume fixé, invariable. On porte les parois du réservoir à une température θ , on attend l'équilibre thermique, puis on mesure la pression du gaz dans le réservoir. Les résultats des mesures sont reportés dans le tableau ci-dessous.

θ (en $^{\circ}\text{C}$)	0	100	-40	150
Pression P du gaz (en bars)	0,92	1,25	0,78	1,42

- 1 Pour une température donnée θ des parois, quelle est la température T du gaz à l'équilibre thermique ?
- 2 Lorsque la température du réservoir augmente, que fait la pression ?
- 3 Ajouter une ligne au tableau de l'énoncé.

On y portera le quotient $\frac{T + 273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}}{P}$.

Que constatez-vous ?

21 Éclatement d'un ballon de baudruche ★★★

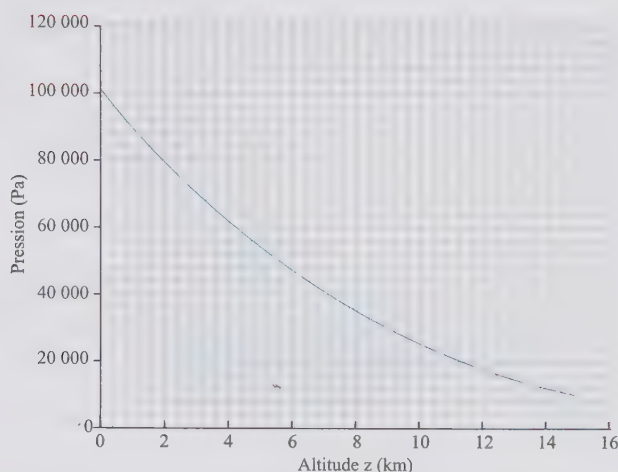
15 min

Corrigé
p. 223

Lycée du Parc, Lyon

On considère un ballon de baudruche, que l'on assimilera à une sphère de rayon variable r . On sait que ce ballon éclate lorsque son rayon atteint un rayon critique $r_c = 17 \text{ cm}$. Au niveau de la mer, on gonfle ce ballon avec de l'hélium, de façon à lui donner un rayon $r_0 = 10 \text{ cm}$, puis on le lâche.

Le graphique ci-dessous représente la pression de l'air dans l'atmosphère terrestre en fonction de l'altitude.



- 1 En supposant constante la température de l'atmosphère terrestre en fonction de l'altitude, déterminer à quelle altitude z_c le ballon va éclater.
- 2 En fait, la température décroît dans l'atmosphère terrestre au fur et à mesure que l'on s'élève. L'altitude réelle z'_c à laquelle le ballon va éclater est-elle inférieure ou supérieure à z_c ?

Indications : Le volume d'une sphère de rayon r est donné par $V = \frac{4}{3}\pi r^3$.

La pression P à l'intérieur d'un ballon de baudruche est légèrement supérieure à la pression de l'air environnant. Toutefois, on fera l'hypothèse simplificatrice que ces pressions sont égales.

Le produit $P \times V$ augmente lorsque la température augmente.

22 Force sur une éprouvette

★★★

30 min

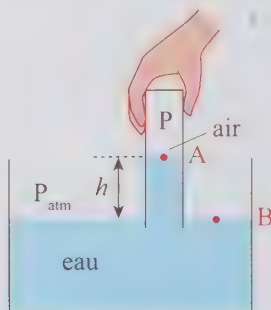
Corrigé
p. 224

Lycée Louis Le Grand, Paris

On considère une éprouvette renversée sur une cuve contenant de l'eau. De l'air est emprisonné au sommet de l'éprouvette, à une pression P différente de la pression atmosphérique. On observe un dénivelé $h = 15$ cm entre la hauteur de l'eau dans la cuve et celle de la surface dans l'éprouvette. On suppose qu'un expérimentateur maintient l'éprouvette de telle manière qu'elle affleure juste sous la surface de la cuve, comme représenté sur la figure ci-dessous. On se pose la question de savoir quelle force l'expérimentateur doit exercer sur l'éprouvette.

- 1 Quelle est la pression de l'air emprisonné dans l'éprouvette ?
- 2 On considère le système composé seulement de l'éprouvette, à l'exclusion de son contenu. Quelles sont les forces s'exerçant sur lui ? Lesquelles se compensent ?

- 3 Le système considéré étant au repos, en déduire la force que l'expérimentateur exerce sur l'éprouvette.



- Données :
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.
 - Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.
 - Rayon de l'éprouvette : $r = 8,0 \text{ mm}$.
 - Masse de l'éprouvette : $m = 120 \text{ g}$.
 - Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$.



Autonomie d'un plongeur



20 min

Corrigé
p. 226

Lycée Michel Montaigne, Bordeaux

On considère un plongeur muni d'une bouteille de volume $V_0 = 10 \text{ L}$ d'air comprimé à la pression $P_0 = 200 \text{ bars}$. Ce plongeur se trouve à la profondeur $h = 15 \text{ m}$. L'air que lui fournit son détendeur est à la même pression P que l'eau qui l'entoure. À chacune de ses inspirations, il inspire un volume $V = 1 \text{ L}$ d'air. Sa respiration est périodique de période $T = 2 \text{ s}$, indépendamment de la profondeur.

- 1 Donner l'expression littérale de la pression P de l'eau autour du plongeur, en utilisant la relation fondamentale de l'hydrostatique.
- 2 En utilisant la loi de Boyle-Mariotte, indiquer quel est le volume V_1 occupé par le gaz correspondant à une inspiration du plongeur, lorsque ce gaz se trouve encore dans la bouteille.
- 3 En déduire le nombre d'inspirations que le plongeur peut réaliser.
- 4 En déduire l'autonomie maximale du plongeur, c.-à-d. le temps qu'il peut passer à la profondeur h .
- 5 Quelle serait l'autonomie du plongeur à la profondeur $h' = 30 \text{ m}$?

- Données :
- Intensité de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$.
 - Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.
 - Pression atmosphérique : $P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$.

1 QCM Testez vos connaissances

➔ Enoncé
p. 197

- 1 **d**. Aucune des trois premières réponses ne peut convenir.
- 2 **a**. Voir le cours.
- 3 **b**. Le dénivelé de liquide est plus important lorsque la pression de l'air est P_2 .

2 Pression sur un piston

➔ Enoncé
p. 197

Lycée Les Fauvettes, Cannes

- 1 Les forces exercées sur le piston sont (voir figure ci-dessous) :

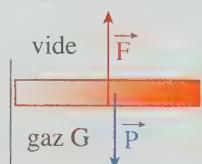


Figure 8.8 – Bilan des forces exercées sur le piston.

- La force pressante $\vec{F}$ exercée par le gaz intérieur à l'enceinte. Elle est dirigée vers le haut et sa valeur est $F = p \times S$ où p est la pression du gaz G.
- Le poids $\vec{P}$ du piston, qui est dirigé vers le bas, et dont la valeur est $P = m \times g$.

- 2 Le piston est en équilibre donc les forces qui s'exercent sur lui se compensent. On peut donc écrire :

$$p \times S = m \times g \quad \text{soit :} \quad p = \frac{m \times g}{S}.$$

L'application numérique donne :

$$p = \frac{10 \times 10}{50 \times 10^{-4}} = 2,0 \times 10^4 \text{ Pa} = 20 \text{ kPa}.$$

3 Forces pressantes sur une fenêtre

➔ Enoncé
p. 198

Lycée Frédéric Ozanam, Lille

- 1 La force s'obtient par application de la formule :

$$\text{force} = \text{pression} \times \text{surface}.$$

Ici, la surface vaut $S = 0,8 \times 1 = 0,8 \text{ m}^2$, donc la force vaut :

$$F = P \times S = 101\,325 \times 0,8 = 81\,060 \text{ N}.$$

Notons que cette force correspond au poids d'une masse d'environ huit tonnes !

- 2 La force se déduit par la même formule ; les valeurs numériques étant inchangées, la valeur de la force est la même qu'à la question précédente :

$$F = 81\,060 \text{ N.}$$

- 3 La fenêtre ne casse pas parce qu'elle est pressée de la même manière sur ses deux faces. Si les pressions ne sont pas exactement égales, il y a risque de rupture. Dans ce cas, pour qu'elle puisse résister, il faut que la fenêtre soit petite (on minimise ainsi S) et épaisse. C'est la raison pour laquelle les hublots d'avion sont beaucoup plus petits que les fenêtres d'un train, par exemple.

4 Bouteille d'oxygène

Enoncé
p. 198

Lycée Carnot, Dijon

- 1 La force pressante exercée par l'air ambiant sur le fond de la bouteille est égale à la pression ambiante multipliée par la surface du fond, soit :

$$F_{\text{amb}} = P_{\text{amb}} \times \pi r^2.$$

L'application numérique donne :

$$F_{\text{amb}} = 10^5 \times 3,14 \times (5 \times 10^{-2})^2 \approx 790 \text{ N.}$$

Notons que nous avons tout d'abord converti la valeur de la pression en pascals.

- 2 La force pressante due à l'oxygène de la bouteille s'évalue par une expression analogue. On obtient :

$$F_{\text{oxy}} = 6 \times 10^5 \times 3,14 \times (5 \times 10^{-2})^2 \approx 4,7 \times 10^3 \text{ N.}$$

- 3 Le bilan des forces pressantes sur le fond de la bouteille lorsque celle-ci est hors de l'eau peut s'obtenir à partir de la figure suivante :

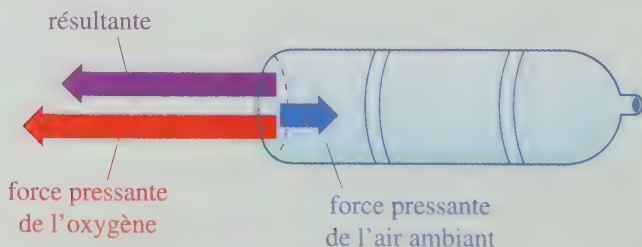


Figure 8.9 – Bilan des forces pressantes sur le fond de la bouteille.

La force résultante des forces pressantes est dirigée vers l'extérieur de la bouteille et a pour valeur : $F = F_{\text{oxy}} - F_{\text{amb}} = 4\,700 - 790 \approx 3\,900 \text{ N.}$

- 4 Calculons la pression p' de l'eau à la profondeur $h = 50$ mètres.
En utilisant la relation fondamentale de l'hydrostatique, nous avons :

$$p' - p = \rho \times g \times h ,$$

ce qui nous donne :

$$p' = p + \rho \times g \times h = 10^5 + 10^3 \times 50 \times 10 = 6 \times 10^5 \text{ Pa} = 6 \text{ bar}$$

Remarque : il peut être utile de savoir que la pression de l'eau augmente d'un bar chaque fois que l'on descend de 10 m. Ici elle augmente donc de 5 bar et passe de 1 à 6 bar.

La force pressante F' due à l'eau sur le fond de la bouteille s'évalue comme précédemment. Puisque la pression est de 6×10^5 Pa, nous retrouvons le résultat de la deuxième question, soit :

$$F' = 6 \times 10^5 \times 3,14 \times (5 \times 10^{-2})^2 \approx 4,7 \times 10^3 \text{ N}.$$

- 5 On voit que cette force pressante et celle de l'oxygène contenu dans la bouteille s'annulent. La force résultante est donc de valeur nulle.

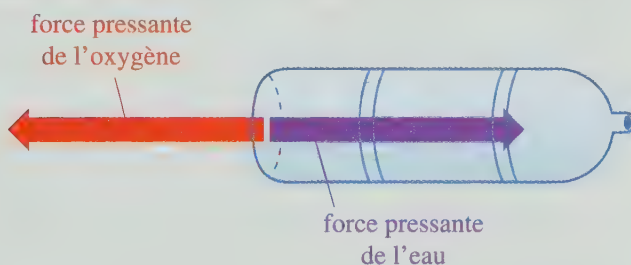


Figure 8.10 – Les forces pressantes sur le fond de la bouteille s'annulent.

- 6 Un calcul similaire à celui de la question précédente indique que la pression de l'eau vaut $p'' = 1,1 \times 10^6$ Pa = 11 bar. La force pressante de l'eau est donc :

$$F'' = 1,1 \times 10^6 \times 3,14 \times (5 \times 10^{-2})^2 \approx 8,6 \times 10^3 \text{ N}.$$

Le bilan des forces pressantes est cette fois dirigé vers l'intérieur de la bouteille et vaut : $8\,600 - 4\,700 = 3\,900$ N.

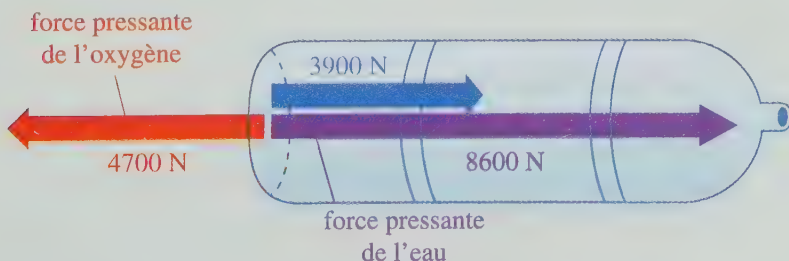


Figure 8.11 – La force pressante exercée par l'eau est supérieure à la force pressante exercée par l'oxygène contenu dans la bouteille.

5

Pointe de punaise

Enoncé
p. 198

Lycée Henri IV, Paris

- 1 On applique la relation $P = mg$. Cela donne :

$$m = \frac{P}{g} = \frac{50}{10} = 5,0 \text{ kg.}$$

Une masse de 5,0 kg aurait un poids égal à la force exercée.

- 2 La pression est égale à la force pressante divisée par la surface. La surface de la tête de la punaise est :

$$S = \pi R^2 = 3,14 \times (4 \times 10^{-3})^2 = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

La pression exercée sur la tête de la punaise est donc :

$$P = \frac{50}{5 \times 10^{-5}} = 10^6 \text{ Pa.}$$

- 3 On considère la punaise en équilibre (ou en mouvement de translation rectiligne uniforme si elle s'enfonce dans le mur). Les forces qui s'exercent sur elle se compensent donc. Ce sont la force exercée par l'opérateur sur la tête de la punaise, et la réaction du mur sur la pointe. Il est parfaitement justifié de négliger le poids de la punaise, au vu de l'ordre de grandeur obtenu à la première question.

La force exercée sur la pointe a donc pour valeur $F = 50 \text{ N}$.

La pression correspondante s'en déduit par :

$$P' = \frac{F}{\pi r^2}.$$

Application numérique :

$$P' = \frac{50}{3,14 \times (10^{-4})^2} \approx 1,6 \times 10^9 \text{ Pa.}$$

Cette pression représente environ 16 000 atmosphères. Elle est considérable. Ceci permet à la pointe de percer les matériaux dans lesquels on veut enfoncer la punaise.

Note : On peut vérifier ce calcul en constatant que le rayon de la pointe est 40 fois plus petit que celui de la tête, donc la pression au niveau de la pointe doit être $40^2 = 1\,600$ fois plus grande qu'au niveau de la tête.



Force pressante

Enoncé
p. 199

Lycée Hector Bertioz, Vincennes

- 1 La force exercée sur la surface est :

$$F = mg = 240 \times 10 = 2,4 \times 10^3 \text{ N.}$$

La pression s'en déduit par :

$$P = \frac{F}{A_1} = \frac{2\,400}{3} = 800 \text{ Pa.}$$

- 2 Cette pression est considérablement plus faible que la pression atmosphérique.

ATTENTION

La pression est ici obtenue en pascals. Dans cette unité, la pression atmosphérique vaut environ cent mille.

- 3 Convertissons la valeur de cette nouvelle surface dans l'unité du Système International, le mètre carré. On a :

$$1 \text{ m} = 10^2 \text{ cm} \quad \text{donc :} \quad 1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 \quad \text{donc :} \quad 1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2.$$

La surface vaut donc :

$$A_2 = 120 \times 10^{-4} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}^2.$$

La pression exercée sur la surface est donc :

$$P' = \frac{F}{A_2} = \frac{2400}{1,2 \times 10^{-2}} = 2,0 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

Cette pression vaut environ deux fois la pression atmosphérique.

→ **Énoncé**
p. 199

7 Mobile autoporteur

Lycée Madeleine Danielou, Rueil-Malmaison

- 1 On a représenté sur la figure ci-dessous les forces s'exerçant sur le mobile autoporteur.

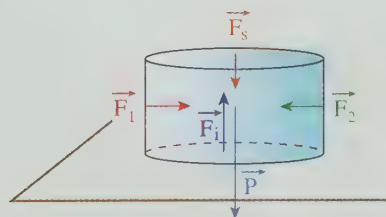


Figure 8.12 – Bilan des forces exercées sur le mobile autoporteur.

Le mobile est soumis :

- À son poids $\vec{P}$, de valeur $P = mg = 0,4 \times 10 = 4 \text{ N}$, et dirigé vers le bas.
- À la force pressante sur sa face supérieure $\vec{F}_s$, dirigée vers le bas. Cette force a pour valeur $F_s = \pi R^2 P_0$, car πR^2 est la surface de la face supérieure du mobile.
- À la force pressante sur sa face inférieure $\vec{F}_i$, dirigée vers le haut. Cette force a pour valeur $F_i = \pi R^2 P_c$, où P_c est la pression du coussin d'air sur la face inférieure.

- Enfin, le mobile est soumis aux forces pressantes sur sa face latérale. Deux forces s'exerçant sur les parties diamétralement opposées s'annulent deux à deux (comme illustré sur la figure par les forces $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$). Ainsi, la somme vectorielle des forces pressantes latérales est nulle.

- 2** Le mobile a une trajectoire rectiligne uniforme. D'après le cours de mécanique, cela signifie qu'il est soumis à des forces qui se compensent, ou encore que la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur lui est nulle.

On en déduit la relation :

$$P + F_s = F_i ,$$

c'est-à-dire :

$$\pi R^2 P_c = \pi R^2 P + mg ,$$

soit encore :

$$P_c = P + \frac{mg}{\pi R^2} .$$

L'application numérique donne (on prend soin de convertir R en mètres au préalable) :

$$P_c = 101\,325 + \frac{4}{\pi 0,05^2} = 101\,834 \text{ Pa} .$$

Cette pression est assez peu différente de la pression atmosphérique standard. On notera qu'une surpression aussi faible que 0,5 % atmosphère est suffisante pour soulever le mobile autoporteur.

8 Ballons de baudruche

 **Énoncé**
p. 200

Lycée Sévigné, Marseille

- 1** La force pressante à l'intérieur du ballon résulte, à l'échelle microscopique, des chocs incessants des molécules du gaz contenu dans le ballon sur ses parois.
- 2** Les ballons se dégonflent car les molécules du gaz contenu à l'intérieur arrivent à s'échapper peu à peu, par *porosité* à travers ses parois, et également au niveau de l'endroit où ils sont ficelés.
- 3** Le ballon gonflé à l'hélium se dégonfle plus vite que le ballon gonflé au dioxygène : les atomes d'hélium arrivent à sortir du ballon plus facilement. Ils sont donc vraisemblablement plus petits que les molécules de dioxygène.

On notera qu'il y a une autre raison à cela (qui est toutefois hors-programme) : les atomes d'hélium ont une vitesse d'agitation plus grande que les molécules d'air (environ 2,7 fois plus), et donc heurtent les parois plus fréquemment, ce qui les aide à sortir plus vite.

9 Calcul de pression

Enoncé
p. 200

Lycée Ampère, Lyon

- 1 Les forces exercées sur le piston sont (voir la figure ci-dessous) :

air ambiant

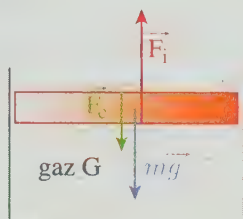


Figure 8.13 – Bilan des forces exercées sur le piston.

- La force pressante $\vec{F}_i$ exercée par le gaz intérieur à l'enceinte. Elle est dirigée vers le haut et sa valeur est $F_i = P_G \times S$ où P_G est la pression du gaz G.
- La force pressante $\vec{F}_e$ exercée par le gaz extérieur à l'enceinte. Elle est dirigée vers le bas et sa valeur est $F_e = P \times S$ où P est la pression de l'air ambiant.
- Le poids $m \times g$ du piston, qui est dirigé vers le bas.

- 2 Le piston est en équilibre donc les forces qui s'exercent sur lui se compensent. On peut donc écrire :

$$F_i = F_e + mg,$$

soit :

$$P_G \times S = P \times S + m \times g \quad \text{soit :} \quad m = \frac{(P_G - P) \times S}{g}.$$

L'application numérique donne :

$$m = \frac{(1,11 \times 10^5 - 1,01 \times 10^5) \times 10^{-2}}{10} = 10 \text{ kg}$$

Il faut faire attention à la conversion des centimètres carré en mètres carré : $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$ (il y dix mille centimètres carré dans un mètre carré).

10 Unité de pression

Enoncé
p. 200

Lycée Carnot, Dijon

- 1 Une pression est une force par unité de surface. Or ici, l'unité de pression fait référence à une masse (la livre) par unité de surface (le pouce carré). Il y a donc confusion entre masse et force (le poids d'une masse donnée). C'est exactement le même type d'abus de langage que dans la formulation *incorrecte* « tel objet pèse 20 kg ».

- 2 La surface est :

$$S = 0,0254^2 = 6,45 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$

- 3 Le poids est donné par :

$$F = mg = 0,454 \times 9,81 = 4,45 \text{ N}.$$

On note F ce poids (c'est une force) pour ne pas le confondre avec la pression P que l'on introduit à la réponse suivante.

- 4 On en déduit la pression correspondant à 1 PSI, qui est égale au poids d'une masse de une livre divisé par une surface d'un pouce carré :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{4,45}{6,45 \times 10^{-4}} = 6,90 \times 10^3 \text{ Pa}.$$

Nous avons donc la correspondance :

$$1 \text{ PSI} = 6,90 \times 10^3 \text{ Pa}.$$

- 5 La pression des pneumatiques est donnée par :

$$P = 32 \times 6,90 \times 10^3 = 2,2 \times 10^5 \text{ Pa} = 2,2 \text{ bars}.$$

Le fabricant de voitures doit indiquer une pression nominale de 2,2 bars.

11 Plongeur en apnée

Enoncé
p. 201

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

- 1 Nous écrivons la relation fondamentale de l'hydrostatique entre la surface (où la pression vaut P_{atm}) et le point le plus profond de la plongée, où la pression vaut P . Elle s'écrit donc :

$$P - P_{\text{atm}} = \rho \times g \times h,$$

soit :

$$P = P_{\text{atm}} + \rho \times g \times h.$$

Application numérique :

Il faut convertir au préalable ρ dans les unités du Système International : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. En définitive, nous avons :

$$P = 101\,325 + 9,8 \times 1,0 \times 10^3 \times 32 = 4,1 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle sont données les indications de l'énoncé.

- 2 La température corporelle du plongeur est constante, et la température de l'air contenu dans ses poumons l'est par conséquent. Nous pouvons donc lui appliquer la loi de Boyle-Mariotte. Si on appelle V le volume recherché, elle s'écrit :

$$P \times V = P_{\text{atm}} \times V_0,$$

soit :

$$V = V_0 \times \frac{P_{\text{atm}}}{P}.$$

Application numérique :

$$V = 5,0 \times \frac{101\,325}{410\,000} = 1,2 \text{ L.}$$

Là encore nous gardons deux chiffres significatifs. Nous constatons que l'air contenu dans les poumons du plongeur a considérablement réduit son volume. Les poumons du plongeur sont « écrasés » par la pression de l'eau.

12

Étude d'une seringue

Enoncé
p. 201

Lycée Ampère, Lyon

Puisque la température de l'air dans la seringue est constante, on peut utiliser la loi de Boyle-Mariotte et écrire que $P \times V = P' \times V'$, où P est la pression initiale (qui est aussi la pression atmosphérique), V le volume initial de l'air emprisonné dans la seringue, et P' et V' les valeurs finales de ces deux grandeurs. En outre, entre la distance l du piston au fond de la seringue et le volume V , on a la relation suivante :

$$V = l \times S,$$

où S est la surface du piston, si on néglige le volume du bout de la seringue.

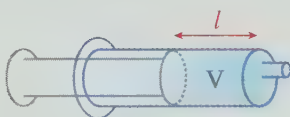


Figure 8.14 – Volume de l'air emprisonné dans la seringue.

On peut donc écrire :

$$P' = \frac{P \times V}{V'} = P \times \frac{S \times l}{S \times l'} = P \times \frac{l}{l'}.$$

Application numérique :

On suppose que la pression atmosphérique est $P = 1 \text{ bar}$ (compte-tenu de la précision des données de l'énoncé, ce degré de précision est bien suffisant). Nous avons donc :

$$P' = 1 \times \frac{10}{2} = 5 \text{ bars} = 5 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

La force pressante à appliquer sur le piston s'en déduit par :

$$F_0 = P' \times S = P' \times \pi r^2 = 5 \times 10^5 \times 3,14 \times (5 \times 10^{-3})^2 \approx 39 \text{ N.}$$

Notons qu'il s'agit d'une force qui correspond au poids d'un objet dont la masse est environ 4 kg.



Calculs de pression

Enoncé
p. 202

Lycée Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

- 1 Lorsque l'on ouvre le robinet, le gaz se répartit entre les deux bouteilles.

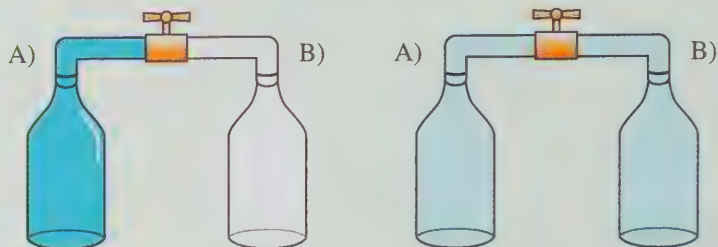


Figure 8.15 – Une partie de l'air passe dans la bouteille B à l'ouverture du robinet.

La température étant considérée comme constante, nous pouvons écrire la loi de Boyle-Mariotte pour le gaz contenu dans les bouteilles, avant (indice i) et après (indice f) l'ouverture du robinet :

$$P_i \times V_i = P_f \times V_f,$$

où V est le volume occupé par le gaz, et P sa pression. Nous utilisons le fait que les bouteilles sont identiques : $V_f = 2V_i$, donc :

$$P_f = \frac{1}{2} P_i.$$

Application numérique :

$$P_f = 7,5 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

- 2 On se retrouve avec une situation similaire à celle du début, à ceci près que la bouteille pleine est maintenant la bouteille B, et que la pression initiale est différente et vaut $7,5 \times 10^4 \text{ Pa}$.

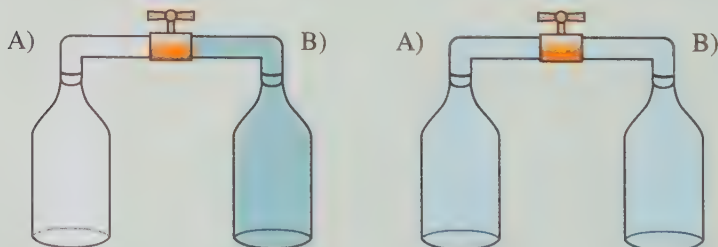


Figure 8.16 – L'air résiduel se répartit entre les deux bouteilles lorsqu'on ouvre le robinet.

On applique un raisonnement identique à celui de la question précédente et on obtient :

$$P_f = \frac{7,5 \times 10^4}{2} \approx 3,8 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

14 Profil de plongée

Enoncé
p. 202

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

- 1 La durée totale de la plongée est l'intervalle de temps qui sépare l'immersion du plongeur et son retour à la surface, soit 40 minutes (36 minutes de plongée et 4 minutes de remontée).
- 2 La pression au point A est la pression atmosphérique, puisque ce point se trouve à la surface de la mer.
- 3 (a) On écrit :

$$\Delta P = k \Delta h \quad \text{soit} \quad P_B - P_A = k \Delta h,$$

où Δh vaut ici 25 m. On en déduit :

$$P_B = P_A + k \Delta h = 1,0 \times 10^5 + 1,0 \times 10^4 \times 25 = 3,5 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

- (b) On utilise la relation :

$$F = P \times S.$$

On convertit au préalable S dans les unités du Système International :

$$S = 30 \text{ cm}^2 = 30 \times (10^{-2})^2 \text{ m}^2 = 3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

On en déduit :

$$F = 3,5 \times 10^5 \times 3,0 \times 10^{-3} = 1,05 \times 10^3 \text{ N}.$$

- (c) On utilise la loi de Boyle-Mariotte, qui dit que le produit PV (où P est la pression du gaz et V son volume) est constant à température constante. On peut l'appliquer puisque l'on suppose ici que la température est constante au cours de la plongée. On peut donc écrire :

$$P_A \times V_A = P_B \times V_B,$$

où $V_A = 7,5 \text{ L}$ est le volume de l'air contenu dans les poumons du plongeur en surface, et où V_B est le volume recherché. On a ainsi :

$$V_A = \frac{P_B}{P_A} V_B = \frac{1,0 \times 10^5}{3,5 \times 10^5} \times 7,5 = 2,1 \text{ L}.$$

L'air contenu dans les poumons du plongeur n'occupe qu'un volume de 2,1 L à la profondeur maximale.

15 Lunettes de plongée

Enoncé
p. 203

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

- 1 Chaque verre a une aire donnée par :

$$A = \pi \times r^2,$$

où $r = 5/2 = 2,5 \text{ cm}$ est le rayon du verre. L'application numérique donne :

$$A = \pi \times (2,5 \times 10^{-2})^2 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2,$$

donc l'aire totale des verres des lunettes vaut $A' = 2 \times A = 4,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

- 2 La force pressante totale exercée par l'air sur le côté externe des verres, au niveau de la mer, avant la plongée, est donnée par le produit de l'aire et de la pression atmosphérique :

$$F = P_{\text{atm}} \times A' = 1,0 \times 10^5 \times 4,0 \times 10^{-3} = 400 \text{ N.}$$

- 3 La force pressante exercée sur le côté interne des verres a exactement même valeur (400 N) et direction que la force pressante exercée sur le côté externe des verres, et un sens opposé. Les forces pressantes interne et externe s'annulent par conséquent.

- 4 On utilise la loi de l'hydrostatique pour déterminer la pression en un point B situé à une profondeur d . Si on considère un point A situé à la surface de la mer (à la pression $P_A = P_{\text{atm}}$), nous avons :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times d,$$

soit :

$$P_B = P_{\text{atm}} + \rho \times g \times d = 1,0 \times 10^5 + 10^3 \times 5 \times 10 = 1,5 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

La force pressante totale exercée par l'eau sur le côté externe des verres est donc :

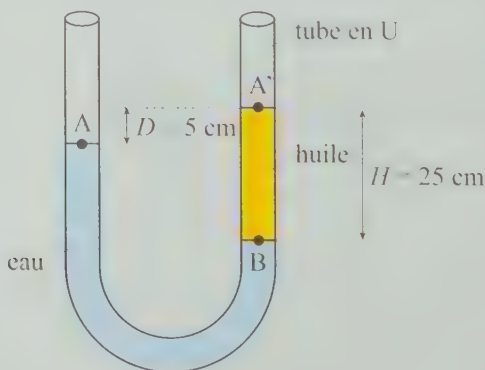
$$F' = P_B \times A' = 1,5 \times 10^5 \times 4,0 \times 10^{-3} = 600 \text{ N.}$$

16 Densité d'une huile

➔ Enoncé
p. 204

Lycée Condorcet, Paris

- 1 L'huile et l'eau sont deux liquides non miscibles. C'est la raison pour laquelle ils se séparent.
- 2 Lorsque deux liquides non miscibles se séparent, le liquide le moins dense (celui qui a la plus petite masse volumique) se trouve au-dessus de l'autre. L'huile se retrouvant en haut, on en déduit que sa densité par rapport à l'eau est inférieure à un.
- 3 Nous considérons les points B, A et A' qui représentés sur la figure ci-dessous.



Nous pouvons écrire la relation fondamentale de l'hydrostatique entre les points A et B d'une part, et entre les points A' et B d'autre part. Cela donne :

$$P_B - P_{A'} = \rho_{\text{huile}} \times g \times H$$

et

$$P_B - P_A = \rho_{\text{eau}} \times g \times (H - D).$$

En outre, les points A et A' sont au contact de l'atmosphère, donc les pressions P_A et $P_{A'}$ sont toutes deux égales à la pression atmosphérique P_{atm} . Nous pouvons donc écrire :

$$P_B - P_{\text{atm}} = \rho_{\text{huile}} \times g \times H = \rho_{\text{eau}} \times g \times (H - D).$$

En transformant cette dernière égalité, nous obtenons :

$$d = \frac{\rho_{\text{huile}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{H - D}{H}.$$

Application numérique :

Nous avons :

$$d = \frac{25 - 5}{25} = \frac{20}{25} = 0,80.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs car c'est la précision avec laquelle on connaît H et $H - D$. Nous voyons, comme attendu, que cette densité est inférieure à un.

- 4** Les seules configurations possibles sont celles où l'huile occupe la partie inférieure du tube, puisque l'huile considérée dans cette dernière question est d'une densité supérieure à l'eau. Il s'agit des situations B et C. On constate en particulier que la situation C correspond à la situation des questions antérieures, où les rôles de l'huile et de l'eau sont inversés. Si le ménisque d'eau n'avait pas été au-dessus du ménisque d'huile du tube de gauche, cette situation aurait été impossible et aurait dû être éliminée.

17

Planète océan

➔ **Énoncé**
p. 205

Lycée du Parc, Lyon

- 1** La valeur du champ de pesanteur à la surface de cette planète est donnée par :

$$g = \frac{G \times M}{R^2},$$

où M est la masse de la planète et R son rayon. L'application numérique donne :

$$g = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 10 \times 5,98 \times 10^{24}}{(2,0 \times 6378 \times 10^3)^2} = 25 \text{ N.kg}^{-1}.$$

On garde deux chiffres significatifs car c'est la précision avec laquelle sont donnés le rayon et la masse de la planète.

- 2 On applique la loi de l'hydrostatique entre un point A situé à la surface de l'océan et un point B situé à une profondeur $d = 70$ km. Elle s'écrit :

$$P_B - P_A = \rho g d \quad \text{donc} \quad P_B = P_A + \rho g d \approx \rho g d,$$

où P_B est la pression recherchée, P_A est la pression à la surface de l'océan ($P_A \approx 0$ d'après l'énoncé), ρ est la masse volumique de l'eau liquide et g la valeur du champ de pesanteur à la surface de cette planète. L'application numérique donne :

$$P_B = 10^3 \times 25 \times 70 \times 10^3 = 1,75 \times 10^9 \text{ Pa}.$$

La valeur du champ de pesanteur étant connue avec deux chiffres significatifs, ce résultat doit également être donné avec deux chiffres significatifs. Toutefois, le dernier chiffre étant un cinq, on garde trois chiffres dans l'expression finale du résultat.

18 Calcul de pression

Enoncé
p. 205

Lycée de la Providence, La Rochelle

La température du système étant maintenue constante, nous pouvons appliquer la loi de Boyle-Mariotte. Le volume final occupé par le gaz est $v' = v_1 + v_2$. Nous notons p' la pression finale recherchée. La loi de Boyle-Mariotte s'écrit ici :

$$p' \times v' = p_1 \times v_1,$$

soit

$$p' = \frac{p_1 \times v_1}{v_1 + v_2} = 3 \times \frac{1}{3} = 1,0 \text{ atm}.$$

Nous gardons ici deux chiffres significatifs compte-tenu de la précision des données de l'énoncé.

10 Amortisseur

Enoncé
p. 206

Lycée Blomet, Paris

La force pressante dans chaque amortisseur doit être égale au *quart* du poids du véhicule, puisque celui-ci a quatre roues, et que son poids est également réparti sur les quatre roues. En outre, la force pressante F dans un amortisseur s'écrit :

$$F = P \times S,$$

où P est la pression du gaz dans l'amortisseur.

On en déduit :

$$P \times S = \frac{m \times g}{4} \quad \text{soit} : \quad P = \frac{m \times g}{4 \times S}.$$

L'application numérique donne :

$$P = \frac{500 \times 10}{4 \times 5 \times 10^{-4}} = 2,5 \times 10^6 \text{ Pa} \approx 25 \text{ atm}.$$

Il faut faire attention à la conversion des centimètres carré en mètres carré : $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$ (il y dix mille centimètres carré dans un mètre carré).

20 Enceinte indilatable

➔ **Énoncé**
p. 206

Lycée Sainte-Geneviève, Versailles

- 1 À l'équilibre thermique, la température de tout le système est uniforme, donc la température du gaz dans le réservoir est égale à la température des parois du réservoir, donc $T = \theta$.
- 2 On lit dans le tableau que plus la température est élevée, plus la pression est grande.
- 3 On reporte ci-dessous le tableau et les résultats.

θ (en $^{\circ}\text{C}$)	0	100	-40	150
Pression P du gaz (en bars)	0,92	1,25	0,78	1,42
$T + 273,15$	297	298	299	298
P				

- 4 On constate que le quotient $\frac{T + 273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}}{P}$ est indépendant (aux erreurs de mesure près) de la température et de la pression.

21 Éclatement d'un ballon de baudruche

➔ **Énoncé**
p. 206

Lycée du Parc, Lyon

- 1 Il s'agit de déterminer la pression à laquelle le ballon va éclater. En utilisant le graphe donné dans l'énoncé, cela nous fournira l'altitude correspondante.

Puisque l'on suppose la température constante, on peut utiliser la loi de Boyle-Mariotte, qui relie la pression P et le volume V du ballon. Le produit $P \times V$ est constant, donc :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \times P = \text{constante.}$$

Par conséquent, puisque $\frac{4}{3}\pi$ est une constante, nous pouvons également écrire :

$$r^3 \times P = \text{constante.}$$

La valeur de la constante est déterminée par le rayon initial r_0 du ballon, et par la pression au niveau de la mer, que l'on peut lire sur le graphe, et qui vaut $P_{\text{atm}} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Nous avons ainsi :

$$r^3 \times P = r_0^3 \times P_{\text{atm}},$$

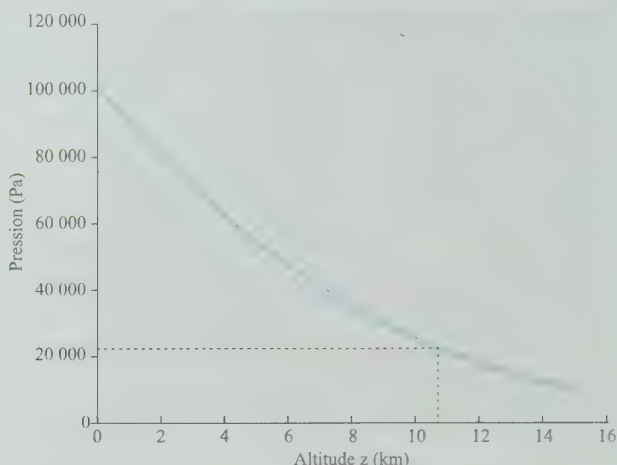
donc la pression critique P_c pour laquelle le ballon éclate (quand $r = r_c$) est donnée par :

$$P_c = P_{\text{atm}} \left(\frac{r_0}{r_c} \right)^3.$$

L'application numérique donne :

$$P_c = 1,01 \times 10^5 \times \left(\frac{10}{17} \right)^3 = 2,1 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

On garde deux chiffres significatifs dans ce résultat. On lit sur le graphe que cette pression critique est atteinte à l'altitude $z_c = 10,7$ km.



- 2** Nous savons que le produit $P \times V$ croît lorsque la température croît. Puisque la température décroît au fur et à mesure que l'on s'élève dans l'atmosphère, à l'altitude z_c , le produit PV est inférieur à la valeur qu'on lui a supposée à la question précédente. La pression P étant fixée, pour une altitude donnée, et donnée par la lecture du graphe, on en déduit que le ballon a un volume *inférieur* à celui inféré à la question précédente, donc un rayon inférieur au rayon critique : à l'altitude z_c il n'a pas encore éclaté, et il éclatera à une altitude *supérieure* à z_c .



Force sur une éprouvette

Enoncé
p 207

Lycée Louis Le Grand, Paris

- 1** On applique la relation fondamentale de l'hydrostatique entre un point B situé à la surface de l'eau de la cuve, et un point A à la surface de l'eau dans l'éprouvette. On a ainsi :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times h.$$

Le point A est en contact avec l'air de l'éprouvette. Il se trouve donc à la pression P avec $P_A = P$. De la même manière, le point B est en contact avec l'atmosphère et se trouve donc à la pression atmosphérique : $P_B = P_{\text{atm}}$. Nous avons donc en définitive :

$$P = P_{\text{atm}} - \rho \times g \times h.$$

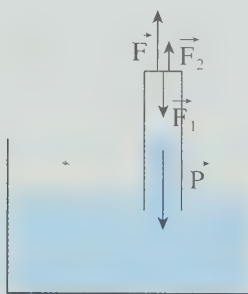
Application numérique :

$$P = 101\,325 - 1,0 \times 10^3 \times 9,8 \times 0,15 = 9,99 \times 10^4 \text{ Pa.}$$

La pression atmosphérique est donnée avec six chiffres significatifs, mais on n'a que deux chiffres significatifs pour les autres données de l'énoncé,

donc la différence $\rho \times g \times h$ est précise jusqu'au chiffre des centaines. On donne donc un résultat précis à la centaine de pascals près, c.-à-d. avec trois chiffres significatifs.

- 2** Les forces exercées sur le système « éprouvette » sont représentées sur la figure ci-dessous.



Ces forces sont :

- Le poids $\vec{P}$ de l'éprouvette, vertical et dirigé vers le bas.
- La force $\vec{F}$ exercée par l'opérateur, que nous décrirons plus en détail ci-dessous.
- La force pressante $\vec{F}_1$ exercée par l'air du laboratoire sur le fond de l'éprouvette. Celle-ci est verticale et dirigée vers le bas.
- La force pressante $\vec{F}_2$ exercée par l'air de l'éprouvette sur le fond de celle-ci. Elle est verticale et dirigée vers le haut.
- Les forces pressantes exercées sur le corps principale de l'éprouvette. Celles-ci ne sont pas représentées sur la figure, et elles se compensent par symétrie : leur somme vectorielle est nulle.

- 3** Le système étant au repos, la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur lui est nulle. Puisque les forces $\vec{P}$, $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ sont verticales, $\vec{F}$ est nécessairement verticale. En outre, puisque $P < P_{\text{atm}}$, nous voyons que $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$ est dirigée vers le bas, donc *a fortiori* $\vec{P} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ est aussi dirigée vers le bas. On en déduit, ce qui est assez intuitif, que $\vec{F}$ est dirigée vers le haut. En projetant sur un axe vertical, nous pouvons écrire la relation suivante sur les grandeurs des forces :

$$F + F_2 - P - F_1 = 0 \quad \text{soit :} \quad F = P + F_1 - F_2.$$

Le poids P de l'éprouvette est donné par $P = mg$. La force pressante F_1 est donnée par le produit de la pression atmosphérique et de la surface du fond de l'éprouvette :

$$F_1 = P_{\text{atm}} \times \pi r^2.$$

De la même manière nous avons pour F_2 :

$$F_2 = P \times \pi r^2.$$

En substituant ces valeurs dans l'expression de F , nous avons :

$$F = mg + P_{\text{atm}} \times \pi r^2 - P \times \pi r^2 = mg + \pi r^2 (P_{\text{atm}} - P).$$

On peut substituer la parenthèse de cette dernière expression parce que nous avons obtenu à la première question :

$$F = mg + \pi r^2 \rho \times g \times h = (m + \pi r^2 h \rho)g.$$

Nous notons ici que le deuxième terme de la parenthèse est égal au volume du cylindre d'eau dans l'éprouvette (base πr^2 et hauteur h) multiplié par la masse volumique de l'eau : c'est la masse de l'eau contenue dans l'éprouvette.

Application numérique :

$$\begin{aligned} F &= [0,12 + \pi \times (8 \times 10^{-3})^2 \times 0,15 \times 10^3] \times 9,8 \\ &= 1,5 \text{ N.} \end{aligned}$$

L'opérateur doit exercer une force de 1,5 N sur l'éprouvette.



Autonomie d'un plongeur

Énoncé
p. 208

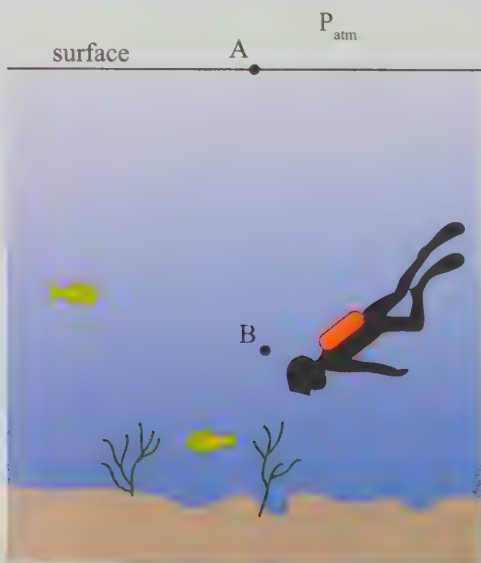
Lycée Michel Montaigne, Bordeaux

- 1** On écrit la relation fondamentale de l'hydrostatique entre le point A (à la surface) et le point B (au niveau du plongeur). Elle s'écrit :

$$P_B - P_A = \rho \times g \times h.$$

Or $P_B = P$ est la pression recherchée, et le point A est au contact de l'atmosphère, donc $P_A = P_{\text{atm}}$. Nous pouvons ainsi écrire :

$$P = P_{\text{atm}} + \rho \times g \times h.$$



Application numérique :

$$P = 101325 + 1,0 \times 10^3 \times 9,8 \times 15 = 2,5 \times 10^5 \text{ Pa.}$$

On garde deux chiffres significatifs dans ce résultat.

- 2** On néglige la variation de température du gaz entre la bouteille et les poumons du plongeur. On applique donc la loi de Boyle-Mariotte qui s'écrit ici :

$$P_0 \times V_1 = P \times V$$

car lorsque le gaz est dans la bouteille où il occupe le volume V_1 (recherché), il est à la pression P_0 , et lorsqu'il se trouve dans les poumons du plongeur, où il occupe un volume V , il se trouve en équilibre de pression avec l'eau environnante, à la pression P . Nous avons donc :

$$V_1 = \frac{P \times V}{P_0}.$$

Application numérique :

$$V_1 = \frac{2,5 \times 10^5 \times 1}{200 \times 10^5} = 1,25 \times 10^{-2} \text{ L.}$$

Étant donné que nous avons gardé le volume v en litres, nous obtenons le volume v_1 également en litres.

- 3** Le nombre total d'inspirations que le plongeur peut réaliser est donné par :

$$n = \frac{v_0}{v_1} = \frac{10}{1,25 \times 10^{-2}} = 800 \text{ inspirations.}$$

- 4** La durée totale que peut passer le plongeur sous l'eau est donc :

$$T_{\text{tot}} = n \times T = 1\,600 \text{ s} \approx 26 \text{ min.}$$

On notera que le résultat devrait être arrondi à 27 et non 26 minutes. Toutefois, comme on cherche à donner une valeur maximale, il convient exceptionnellement de donner la valeur à deux chiffres significatifs immédiatement inférieure. Compter sur 27 minutes d'autonomie pourrait se révéler dangereux pour le plongeur.

- 5** Il suffit de répéter les applications numériques de chacune des questions, en utilisant la pression P' qui règne à la profondeur $h' = 30 \text{ m}$. Nous avons, en rassemblant les résultats des questions précédentes :

$$T'_{\text{tot}} = T \frac{P_0 \times v_0}{P' \times v}.$$

La nouvelle pression est :

$$P' = 101325 + 1,0 \times 10^3 \times 9,8 \times 30 = 4,0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

et l'autonomie vaut donc :

$$T'_{\text{tot}} = 2 \times \frac{2,0 \times 10^7 \times 10}{4,0 \times 10^5 \times 1} = 1\,000 \text{ s} \approx 16 \text{ min.}$$

L'autonomie décroît lorsque la profondeur de la plongée augmente.

Extraction, séparation et identification d'espèces chimiques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Techniques d'extraction et de séparation
3. Techniques d'identification

Thèmes : la santé, la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Jules Ferry, Paris

Pour déceler la présence d'éventuels colorants dans un sirop concentré sucré de menthe, on utilise la technique de séparation appelée chromatographie sur couche mince. Pour ce faire on dépose une goutte de sirop sur la ligne de base d'un chromatogramme. On y dépose aussi une goutte des colorants suivants : E140, E120, E102. On obtient le chromatogramme représenté ci-dessous :

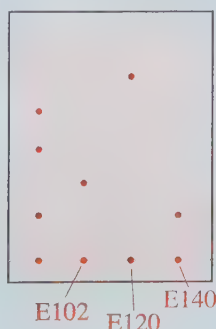


Figure 9.1 – Chromatogramme du sirop de menthe et de colorants.

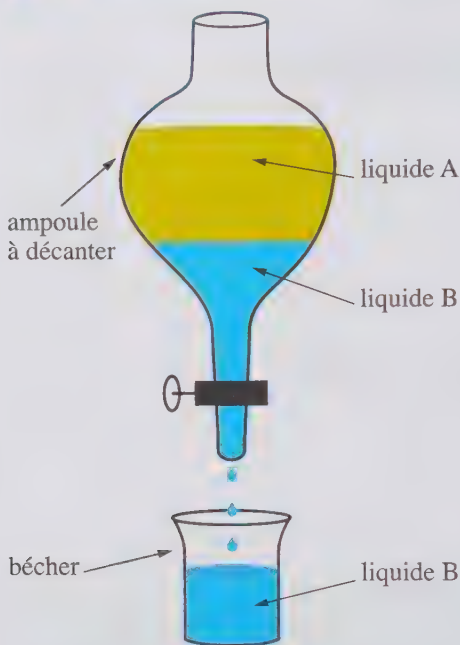
- 1 Quel colorant a le plus grand rapport frontal ?
- 2 Quel est le colorant présent dans le sirop de menthe ? À votre avis, quelle est sa couleur ?

Voir corrigé page 234

Nous présentons dans ce chapitre diverses techniques destinées à séparer, extraire et identifier des espèces chimiques.

2 Techniques d'extraction et de séparation

2.1 Décantation



On peut utiliser la technique de décantation lorsque l'on a deux phases liquides non miscibles (c'est-à-dire qui ne se mélangent pas entre elles). La phase la moins dense se retrouve au-dessus de la phase la plus dense. On peut alors utiliser une ampoule à decanter pour séparer les deux phases.

En général, les deux phases miscibles sont une phase aqueuse (où le solvant est de l'eau) et une phase dite organique (où le solvant est une molécule organique, comme l'hexane ou le cyclohexane). La phase organique est en général moins dense que la phase aqueuse, et se trouve donc dans la partie supérieure de l'ampoule à decanter.

Figure 9.2 – Utilisation d'une ampoule à decanter. Les liquides A et B ne sont pas miscibles entre eux. On recueille dans le bécher le liquide le plus dense (ici B).

2.2 Filtration

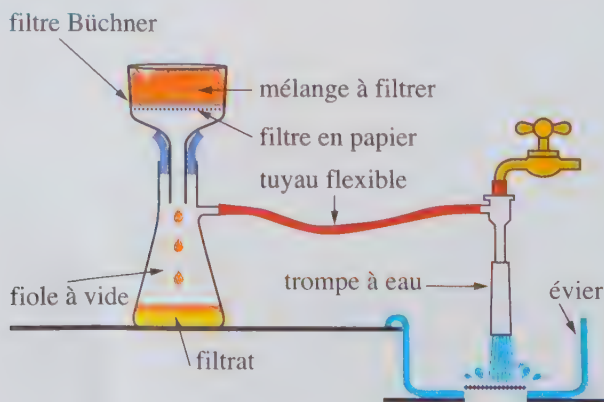


Figure 9.3 – Filtrage sur Büchner.

La filtration permet de séparer une phase solide d'une phase liquide. On utilise pour ceci un entonnoir de forme spécifique (appelé filtre Büchner) avec un papier filtre. La phase solide reste dans l'entonnoir, tandis que la phase liquide traverse le filtre. On peut accélérer la filtration en « aspirant » le liquide grâce à un montage dit *sur Büchner*. On utilise pour cela une fiole à vide connectée à une trompe à eau. Le passage d'eau dans cette trompe crée une dépression dans la fiole à vide.

Le liquide qui se trouve dans l'entonnoir est alors soumis à des forces pressantes différentes (voir le chapitre 8 sur la pression d'un gaz) : à sa surface, il est soumis à la pression atmosphérique, tandis qu'au fond, il est soumis à une pression moindre, celle qui règne dans la fiole à vide. La somme des forces pressantes est une force dirigée vers le bas, qui « force » le liquide à traverser le filtre et accélère ainsi le processus de filtration.

Hydrodistillation

Le principe de l'hydrodistillation est d'entraîner dans la vapeur d'eau des composés volatils (qui s'évaporent facilement) de substances naturelles. Le mélange de vapeur d'eau et de composés volatils est refroidi en passant dans un tube réfrigérant, dont les parois sont maintenues à une température proche de la température ambiante par circulation d'eau. Dans cette colonne, la vapeur d'eau et les composés volatils se condensent. Le tube réfrigérant étant incliné, on récupère finalement le mélange d'eau et composés volatils (appelé hydrodistillat) dans une éprouvette.

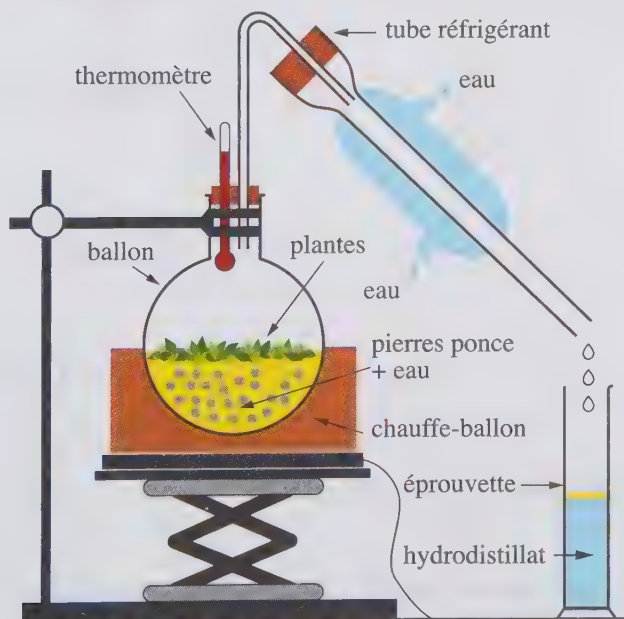


Figure 9.4 – Montage d'hydrodistillation.

2.4 Extraction par solvant

Définition 1

La solubilité est la concentration massique maximale que l'on peut obtenir par dissolution d'une espèce chimique dans un solvant donné.

La solubilité, pour une espèce donnée, dépend considérablement du solvant.

Certains composés sont peu solubles dans certains liquides et beaucoup plus dans d'autres. C'est par exemple le cas du diiode, qui est beaucoup plus soluble dans le cyclohexane que dans l'eau. Le cyclohexane et l'eau n'étant pas miscibles, on peut utiliser la technique de décantation vue ci-dessus pour séparer les phases.

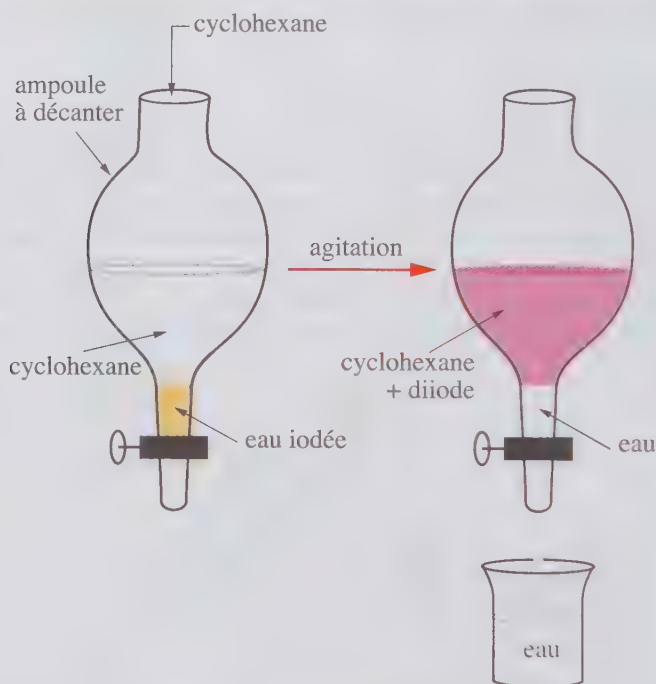


Figure 9.5 – Principe d'extraction du diiode par un solvant organique.

3 Techniques d'identification

3.1 Tests chimiques : identification des ions en solution

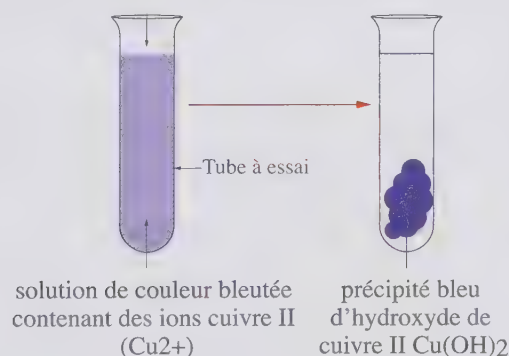
Certains ions de charge opposée ne peuvent coexister en solution aqueuse. Ils réagissent pour former un composé solide, appelé précipité. L'existence et la couleur de ce précipité peuvent permettre l'identification d'ions en solution aqueuse. Nous donnons dans le tableau ci-dessous la liste des principaux tests d'identification.

Ion	réactif	Couleur et nom du précipité
Cu^{2+}	ion HO^-	Précipité bleu d'hydroxyde de cuivre (II) : $\text{Cu}(\text{HO})_{2(s)}$
Fe^{2+}	ion HO^-	Précipité vert d'hydroxyde de fer (II) : $\text{Fe}(\text{HO})_{2(s)}$
Fe^{3+}	ion HO^-	Précipité rouille d'hydroxyde de fer (III) : $\text{Fe}(\text{HO})_{3(s)}$
Zn^{2+}	ion HO^-	Précipité blanc d'hydroxyde de zinc (II) : $\text{Zn}(\text{HO})_{2(s)}$
Cl^-	ion Ag^+	Précipité blanc de chlorure d'argent : $\text{AgCl}_{(s)}$ Ce précipité noircit à la lumière
SO_4^{2-}	ion Ba^{2+}	Précipité blanc de sulfate de baryum : $\text{BaSO}_{4(s)}$

Les ions HO^- sont appelés ions hydroxyde. Pour les tests d'identification où l'ion hydroxyde est un réactif, on utilise généralement une solution d'hydroxyde de sodium (encore appelée soude).

La figure ci-dessous résume le protocole expérimental pour l'identification d'ions cuivre (II).

on introduit quelques gouttes d'une solution d'hydroxyde de sodium, contenant des ions HO^- et Na^+



3.2 Tests physiques

On peut mesurer les propriétés physiques d'un composé, comme sa densité ou sa température de fusion ou d'ébullition, pour l'identifier.

La température de fusion se mesure à l'aide d'un banc Kofler. Il s'agit d'un banc sur lequel une plaque métallique présente un gradient de température (la température croît de manière régulière d'un côté à l'autre de la plaque). On y dépose une petite quantité d'une substance solide dont on souhaite mesurer la température de fusion. On la place initialement à gauche de la plaque, et on la déplace vers la droite, jusqu'à l'apparition de la première goutte de liquide. On lit alors la température de la plaque à l'endroit où la fusion a lieu avec le curseur du banc. Le déplacement vers la droite doit être suffisamment lent pour permettre à la substance d'être en équilibre thermique avec la plaque.

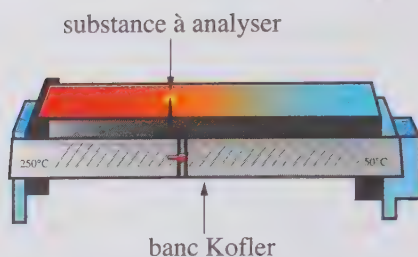


Figure 9.6 – Représentation schématique d'un banc Kofler.

Comparaison avec une référence : la chromatographie

Le but de la chromatographie sur couche mince est de séparer les différents constituants d'un mélange. Pour ce faire, on dissout le mélange dans un solvant (appelé *éluant*) qui ne réagit chimiquement avec aucune des espèces à séparer. L'éluant s'élève par *capillarité* le long d'un substrat de silice hydratée (la *phase stationnaire*). En s'élevant, il entraîne (c'est le phénomène d'*élution*) les différentes espèces dissoutes, avec une efficacité différente pour chacune de ces espèces. Si, au bout d'un temps t , on mesure la distance parcourue par l'éluant (H) et la distance parcourue par un constituant C (h), alors on peut calculer le nombre sans dimension suivant :

$$R_f = \frac{h}{H}$$

appelé rapport frontal du constituant C dans l'éluant E , et qui est toujours compris entre 0 et 1.

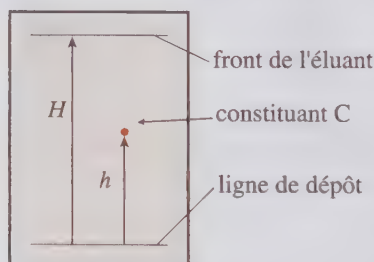


Figure 9.7 – Parties caractéristiques d'un chromatogramme.

Solution de l'exercice type

Lycée Jules Ferry, Paris

- 1 Le colorant qui a le plus grand rapport frontal est celui dont la tache est la plus proche du front de l'éluant sur le chromatogramme, donc il s'agit du colorant E120.
- 2 Le chromatogramme du sirop de menthe montre une tache à la même hauteur que la tache du colorant E140. C'est donc celui-ci qui est présent dans le sirop de menthe. On doit s'attendre à ce qu'il ait une couleur verte.

Voir énoncé page 229

1 **QCM** Testez vos connaissances 5 min Corrigé
p. 244

- 1** On peut utiliser une ampoule à décanter pour séparer deux liquides
 - a** miscibles entre eux
 - b** non miscibles entre eux
- 2** Lors d'une hydrodistillation, le tube de réfrigérant permet
 - a** de refroidir le contenu du ballon
 - b** de séparer la vapeur d'eau des composés volatils
 - c** de condenser le mélange de vapeur d'eau et de composés volatils
- 3** Lorsque l'on sépare deux liquides en utilisant une ampoule à décanter, on récupère dans le bécher sous l'ampoule le liquide
 - a** le plus dense
 - b** le moins dense
- 4** Un banc Kofler permet de mesurer
 - a** une température d'ébullition
 - b** une température de fusion
- 5** Un précipité d'hydroxyde de cuivre (II)
 - a** a une couleur blanche
 - b** a une couleur rouille
 - c** a une couleur bleue
- 6** Identifier l'intrus parmi les précipités suivant :
 - a** précipité de sulfate de baryum
 - b** précipité de chlorure d'argent
 - c** précipité d'hydroxyde de zinc
 - d** précipité d'hydroxyde de cuivre (II)
- 7** Un précipité noircit à la lumière. Il s'agit d'un précipité
 - a** d'hydroxyde de zinc
 - b** de chlorure d'argent
 - c** de sulfate de baryum
- 8** Dans une chromatographie sur couche mince, le composé qui forme la tache qui se trouve le plus près de la ligne de dépôt est celui qui a
 - a** le plus grand rapport frontal
 - b** le plus petit rapport frontal

2 Analyse d'une boisson



5 min

Corrigé
p. 244

Lycée Colbert, Lyon

On utilise la technique de la chromatographie sur couche mince pour analyser une boisson gazeuse, et la même boisson en version *light*, où le goût sucré provient d'un édulcorant de synthèse, l'aspartame. Sur la même couche, on réalise également la chromatographie d'un échantillon de saccharose et d'un échantillon d'aspartame. On admettra que l'aspartame a un rapport frontal supérieur à celui du saccharose.

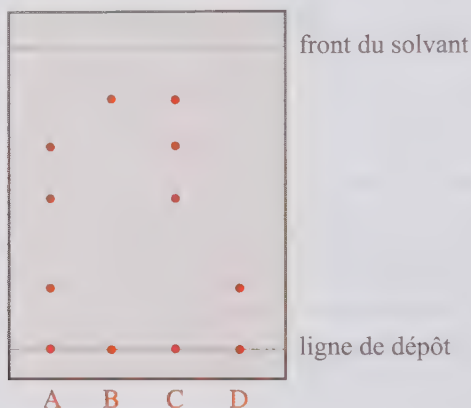


Figure 9.8 – Chromatogramme décrit dans l'énoncé.

- 1 Identifier les échantillons de A à D sur la figure ci-dessus.
- 2 Donner une estimation du rapport frontal de l'aspartame et du saccharose.

Vocabulaire



5 min

Corrigé
p. 245

Lycée Notre-Dame des Oiseaux, Paris

Donner le nom des accessoires représentés ci-dessous.

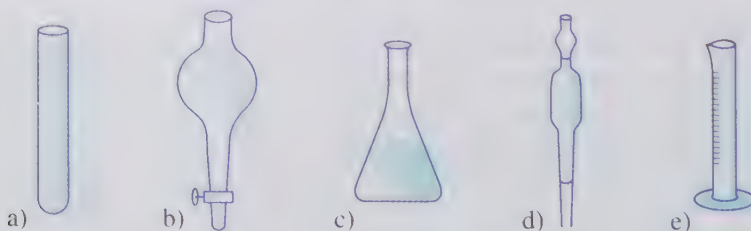


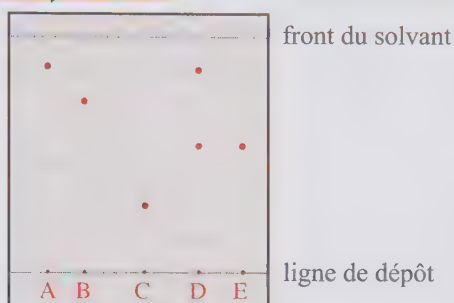
Figure 9.9 – Divers accessoires de verrerie.

4 Chromatographie sur couche mince ★★

10 min

Corrigé
p. 245

Lycée Florent-Schmitt, Saint-Cloud



On réalise la chromatographie sur couche mince d'un sirop de fraise. On dépose une goutte de ce sirop sur la ligne de dépôt, ainsi que des gouttes de différents colorants :

- le bleu patenté E131 ($R_f = 0,4$) ;
- la tartrazine E102 ($R_f = 0,9$) ;
- l'azorubine E122 ($R_f = 0,75$) ;
- et le rouge cochenille E124 ($R_f = 0,6$).

On obtient le chromatogramme ci-dessus.

- 1 On a oublié de noter à quelle solution correspond chaque point du dépôt A, B, C, D et E. Identifiez-les en justifiant votre démarche.
- 2 Quels sont les colorants contenus dans ce sirop de fraise ?

5 Rapports d'élution

★★

5 min

Corrigé
p. 246

Lycée Jean-Baptiste Say, Paris

diéthyléthane

hexane

acétone



Figure 9.10 – A et B sont élués par différents solvants.

On désire identifier deux espèces A et B dans des échantillons, par chromatographie sur couche mince. On pratique des essais avec des éluants différents, sur des échantillons contenant soit l'espèce A, soit l'espèce B. Les résultats sont montrés à la figure 9.10. Quel est le meilleur éluant et pourquoi ?

6

Composition de médicaments

★★

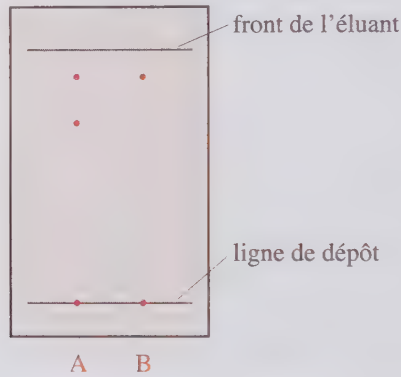
15 min

Corrigé
p. 246

Lycée Paul Painlevé, Oyonnax

À l'aide d'un éluant convenablement choisi, on réalise la chromatographie sur couche mince de caféine et de paracétamol, qui ont respectivement pour rapports frontaux 0,72 et 0,89. On fait migrer le solvant de la distance $H = 3,8$ cm.

- De quelle distance ont migré respectivement la caféine et le paracétamol ?
- Représenter à l'échelle le chromatogramme obtenu.
- On réalise le chromatogramme de deux médicaments A et B, ayant entre autres des propriétés anti-douleur. On obtient le chromatogramme ci-dessous.



Indiquer le ou les principe(s) actif(s) de chaque médicament.

7

Huile essentielle de lavande

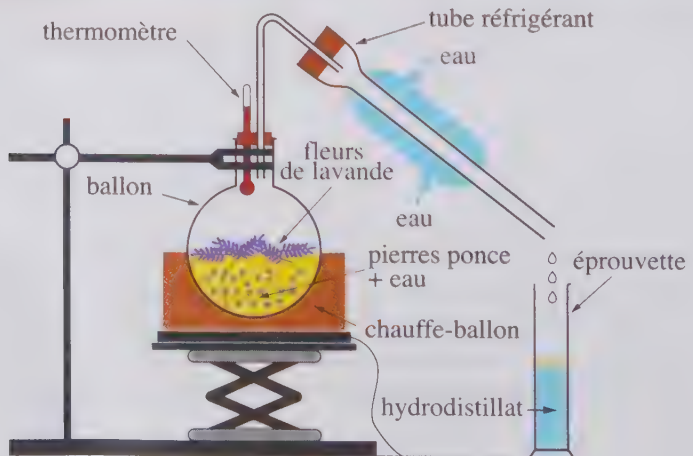
★★

20 min

Corrigé
p. 247

Lycée Eugène Delacroix, Montrouge

- Pour extraire de l'huile essentielle de lavande, on réalise le montage ci-dessous.



- (a) Quel est le rôle du tube réfrigérant ?
- (b) Que recueille-t-on dans l'éprouvette ?
- (c) Quel est le rôle des morceaux de pierre ponce introduits dans le ballon ?

2 Une fois l'hydrodistillation terminée, on verse le contenu de l'éprouvette dans une ampoule à décanter. On ajoute de l'eau salée, et 10 mL de cyclohexane. On agite en dégazant régulièrement.

- (a) En quoi consiste l'opération de dégazage et quel est son utilité ? Quelle précaution doit-on observer lors du dégazage ?
- (b) Le cyclohexane n'est pas miscible à l'eau. Qu'observe-t-on dans l'ampoule à décanter, une fois qu'elle est mise en position verticale ?
- (c) On fait tomber dans un bécher le liquide inférieur jusqu'à la surface de séparation entre les deux phases. À l'issue de cette séparation, où se trouve l'huile essentielle de lavande ?

Données :

- Densité du cyclohexane : 0,78.
- L'huile essentielle de lavande est très peu soluble à froid dans l'eau salée.
- L'huile essentielle de lavande est très soluble à froid comme à chaud dans le cyclohexane.



Suivi de synthèse



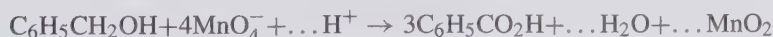
20 min

Corrigé
p. 248

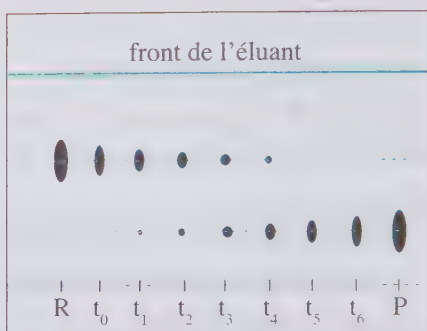
Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

L'acide benzoïque $\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H}$ est un conservateur présent dans de nombreux produits alimentaires.

- 1** La synthèse de l'acide benzoïque s'effectue en chauffant à reflux un mélange d'alcool benzylique $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}$ et d'ions permanganate MnO_4^- en présence d'ions hydrogène. Compléter les coefficients stœchiométriques manquants de l'équation chimie de cette synthèse :



- 2** Pour suivre l'évolution de cette transformation chimique, on réalise plusieurs CCM du mélange réactionnel : elles indiquent l'avancée de la réaction. Toutes les quinze minutes, une faible quantité de mélange réactionnel est prélevée et déposée sur une plaque de CCM. Au bout d'une heure et demie, la plaque est mise à éluer puis révélée. L'alcool benzylique et l'acide benzoïque sont deux espèces chimiques solubles dans l'éluant choisi.



- Décrire l'état initial du système chimique étudié.
- D'après la CCM, que dire de l'évolution de la quantité de l'espèce chimique R au cours du temps ?
- À partir de quel instant peut-on déceler la présence du produit dans le mélange ?
- Est-il nécessaire d'attendre une heure et demie pour arrêter le chauffage ?



Extraction de l'eugénol

★★★

15 min

Corrigé
p. 249

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

L'eugénol est une espèce chimique présente dans de nombreuses épices, notamment le clou de girofle. Il possède en outre des propriétés antiseptiques et analgésiques. On souhaite extraire l'eugénol contenu dans une solution aqueuse. Afin de décider du protocole expérimental à adopter, on donne les informations suivantes :

Solubilité et densité

	Eau	Éthanol	Éther
Solubilité eugénol	peu soluble	soluble	soluble
Densité	1,0	0,79	0,71

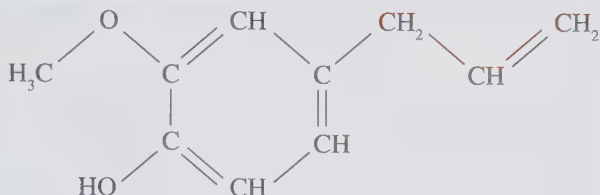
Miscibilité avec l'eau

Éthanol	Éther
Miscible	Non miscible

Pictogramme observé sur la bouteille d'éthanol et d'éther



Formule semi-développée de l'eugénol



- 1 Donner la formule brute de l'eugénol ?
- 2 Donner deux critères à prendre en compte pour choisir le solvant extracteur.
- 3 Parmi les deux solvants proposés, lequel doit-on utiliser pour extraire l'eugénol d'une solution aqueuse ? Justifier.
- 4 Quelle précaution doit-on prendre pour manipuler le solvant choisi ?
- 5 Le protocole expérimental à suivre pour réaliser cette extraction est le suivant :
 - (a) Verser la solution aqueuse contenant l'eugénol dans une ampoule à décanter.
 - (b) Ajouter le solvant extracteur.
 - (c) Boucher l'ampoule à décanter, agiter en dégazant régulièrement.
 - (d) Replacer l'ampoule sur son support, retirer le bouchon et laisser décanter.

Schématiser l'ampoule à décanter telle qu'elle se présente à la fin de cette manipulation. Indiquer clairement le nom et le contenu de chaque phase. Justifier la position des phases dans l'ampoule.

10 Enquête policière



20 min

Corrigé
p. 250

Lycée Lakanal, Sceaux

Alerte au laboratoire de chimie ! Un composé secret d'une valeur inestimable a mystérieusement disparu du bureau du directeur. Pourtant, seuls cinq employés peuvent avoir accès à ce lieu sécurisé. Immédiatement, il craint que l'un de ceux-ci ait voulu lui dérober ce composé pour le vendre à un laboratoire concurrent.

Appelée sur les lieux, la police scientifique retrouve des traces de pas contenant deux poudres A et B différentes.

À la demande de la police, le directeur fournit une liste qui indique les substances chimiques que l'on trouve dans chacune des zones de travail :

Zones du laboratoire	
Zone 1 : sulfate de zinc (II)	Zone 2 : chlorure de fer (II)
Zone 3 : chlorure de fer (III)	Zone 4 : sulfate de cuivre (II)
Zone 5 : sulfate de fer (III)	Zone 6 : sulfate de fer (II)
Zone 7 : chlorure de zinc (II)	Zone 8 : chlorure de cuivre (II)

Le directeur fournit également à la police une liste du personnel précisant, pour chaque employé, les zones auxquelles il a accès :

Employé(e)	Zones auxquelles il ou elle a accès
M. Antoine MARTIN	Zones 1, 3, 6
M ^{lle} Aurélie DURAND	Zones 2, 4, 8
M. Albert DUPONT	Zones 3, 6, 7
M ^{me} Thérèse PERRAULT	Zones 1, 4, 8
M. Justin BOYER	Zones 2, 5, 7

Les experts de la police scientifique ont mis en solution aqueuse les deux poudres A et B récupérées sur les lieux. Ils disposent de trois réactifs pour mener leurs expériences :

- Une solution d'hydroxyde de sodium, également appelée soude, de formule NaOH.
- Une solution de nitrate d'argent de formule AgNO_3 .
- Une solution de chlorure de baryum de formule BaCl_2 .

- 1 Quels sont les ions contenus dans les trois réactifs ? On précisera leur formule.
- 2 Un cation est un ion chargé positivement, et un anion est un ion chargé négativement. Compléter le tableau suivant en indiquant les ions (anion et cation) présents dans les différentes zones :

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8
Cation								
Anion								

- 3 Les experts de la police scientifique versent une partie de la solution aqueuse où l'on a dissout la poudre A dans un tube à essai. Ils ajoutent ensuite à ce tube à essai quelques gouttes de la solution de nitrate d'argent, et observent un précipité qui noircit à la lumière. Quels ions présent dans la solution de la poudre A met-on en évidence ?

4 Ils versent ensuite une autre partie de la solution de la poudre A dans un autre tube à essai, auquel ils ajoutent quelques gouttes de la solution d'hydroxyde de sodium. Ils observent la formation d'un précipité blanc. De quel autre ion détecte-t-on la présence ?

5 Les experts de la police scientifique s'intéressent ensuite à la composition de la poudre B. Pour ce faire, ils versent une partie de la solution obtenue par dissolution de la poudre B dans un tube à essai, auquel ils ajoutent quelques gouttes de la solution de chlorure de baryum. Rien ne se produit.

Enfin, dans un autre tube à essai, ils versent une partie de la solution obtenue de la poudre B, et quelques gouttes de la solution d'hydroxyde de sodium. Ils observent un précipité de couleur rouille. En vous aidant du tableau obtenu à la deuxième question, retrouver les ions présents dans la solution de la poudre B. À quelle zone correspond-elle ?

6 Compte-tenu des informations obtenues par la police scientifique, pouvez-vous donner le nom du principal suspect ?

1 **Testez vos connaissances**Enoncé
p. 235

- 1 **b.** Si les liquides sont miscibles entre eux on ne peut pas les séparer avec une ampoule à décanter.
- 2 **c.** Il permet de condenser le mélange pour le recueillir dans un récipient.
- 3 **a.** On récupère le liquide qui se trouve en bas, qui est le plus dense.
- 4 **b.** Un banc Kofler permet de mesurer une température de fusion.
- 5 **c.** Il a une couleur bleue caractéristique.
- 6 **d.** C'est le seul qui n'a pas une couleur blanche.
- 7 **b.** Il s'agit du précipité de chlorure d'argent.
- 8 **b.** Il s'agit du composé qui a été le moins entraîné par l'éluant, donc c'est celui qui a le plus petit rapport frontal.

2 **Analyse d'une boisson**Enoncé
p. 236**Lycée Colbert, Lyon**

- 1 Les échantillons qui donnent lieu à une seule tache sont ceux des espèces chimiques que l'on cherche à identifier, qui sont le saccharose et l'aspartame. Ils correspondent donc chacun à l'un ou l'autre des échantillons B et D. L'échantillon B se retrouve plus loin de la ligne de dépôt que l'échantillon D, donc il a un plus grand rapport frontal. L'échantillon B correspond donc à l'aspartame, et l'échantillon D au saccharose. Cela nous permet d'identifier les boissons : celle qui contient du saccharose (donc la boisson normale) est la A, et la C est la version *light*. En résumé :
(A) boisson normale (B) aspartame (C) boisson *light* (D) saccharose
- 2 Il s'agit d'estimer la distance du front du solvant à la ligne de dépôt, ainsi que les distances dont ont migré l'aspartame et le saccharose. En mesurant sur la figure 9.8, on trouve les valeurs indiquées ci-dessous :

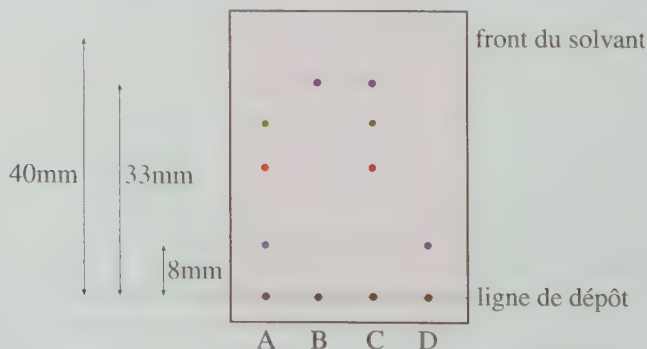


Figure 9.11 – Distances parcourues par le solvant et les différentes espèces.

La distance H parcourue par le solvant vaut : $H \approx 40$ mm. La distance dont a migré l'aspartame est $h_{\text{aspartame}} \approx 33$ mm, et la distance dont a migré le saccharose est $h_{\text{saccharose}} \approx 8$ mm. On en déduit les rapports frontaux :

(a) de l'aspartame :

$$R_f = \frac{h_{\text{aspartame}}}{H} = \frac{33}{40} \approx 0,83$$

(b) du saccharose :

$$R_f = \frac{h_{\text{saccharose}}}{H} = \frac{8}{40} = 0,2$$

Vocabulaire

Enoncé
p. 236

Lycée Notre-Dame des Oiseaux, Paris

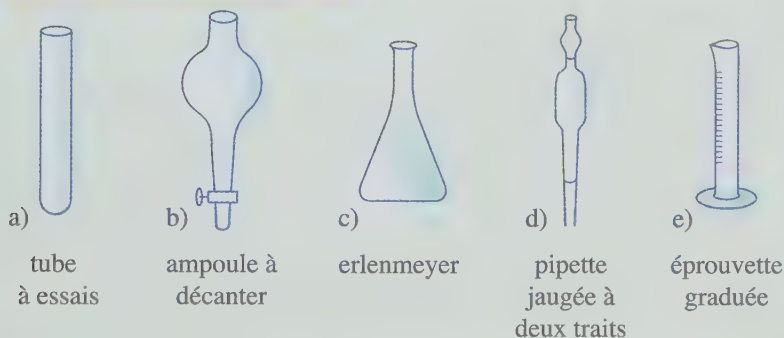


Figure 9.12 – Nom des ustensiles de verrerie.

Chromatographie sur couche mince

Enoncé
p. 237

Lycée Florent-Schmitt, Saint-Cloud

- Le point de dépôt D donne plusieurs taches. Il ne peut donc pas correspondre à un colorant pur. Il s'agit donc du point de dépôt du sirop de fraise. Les autres points correspondent aux quatre colorants. Le point le plus proche du front du solvant correspond à celui qui a un rapport frontal R_f le plus élevé, et celui qui est le plus proche de la ligne de dépôt à celui qui a le rapport frontal le plus petit. On peut donc ainsi identifier chacun des points en fonction des R_f donnés dans l'énoncé. On obtient le chromatogramme page suivante (figure 9.13).
- On constate que le sirop de fraise a donné deux taches, l'une à l'ordonnée de la tartrazine, l'autre à l'ordonnée du rouge cochenille, donc le sirop de fraise contient ces deux colorants (E102 et E124). On peut également conclure que le sirop de fraise *ne contient pas* les colorants E122 et E131 (azorubine et bleu patenté), et ne contient pas d'autres colorants que ceux pour lesquels on a fait un test, sans quoi on verrait apparaître d'autres taches sur la ligne du sirop de fraise.

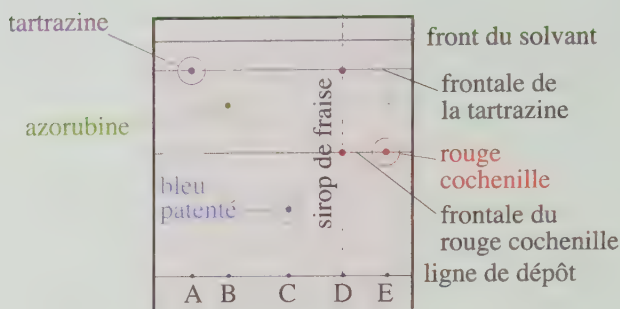


Figure 9.13 – Illustration relative à la question 1.

5 Rapports d'élution

Lycée Jean-Baptiste Say, Paris

Enoncé
p. 237

Le meilleur éluant dépend des espèces que l'on souhaite mettre en évidence. Dans le cas présent, c'est celui qui va permettre le mieux de les séparer. Les espèces ont un rapport frontal très petit (et comparable) dans le diéthyléthane, donc celui-ci n'est pas du tout adapté. Elles sont bien mieux entraînées par l'hexane, mais leur rapport frontal est comparable, donc l'hexane ne permet pas de bien les séparer. L'acétone est le solvant le mieux adapté, puisque les deux espèces y ont un rapport frontal nettement différent.

Composition de médicaments

Lycée Paul Painlevé, Oyonnax

Enoncé
p. 238

- 1 La caféine a migré de la distance

$$d_c = R_{f,c} \times H = 0,72 \times 3,8 = 2,7 \text{ cm},$$

où $R_{f,c}$ est le rapport frontal de la caféine. De la même manière, le paracétamol migre sur la distance :

$$d_c = R_{f,p} \times H = 0,89 \times 3,8 = 3,4 \text{ cm},$$

où $R_{f,p}$ est le rapport frontal du paracétamol.

- 2 On en déduit, à l'échelle, le chromatogramme ci-contre.

front de l'éluant

ligne de dépôt



- 3** On voit que le médicament B donne deux taches, respectivement aux rapports frontaux de la caféine et du paracétamol : il contient donc ces deux principes actifs.

Le médicament A, en revanche, ne contient qu'une tache, au rapport frontal du paracétamol : son seul principe actif est le paracétamol.

7 Huile essentielle de lavande

Enoncé
p. 238

Lycée Eugène Delacroix, Montrouge

- 1**
- (a) Le tube réfrigérant sert à condenser la vapeur d'eau et les composés volatils qu'elle entraîne.
 - (b) Dans l'éprouvette on recueille donc de l'eau, ainsi que les composés volatils présents dans les fleurs de lavande, qui constituent l'huile essentielle de lavande.
 - (c) Les morceaux de pierre ponce ont pour rôle de réguler l'ébullition. Ils permettent la formation de nombreuses petites bulles, et empêchent la formation de très grandes bulles qui pourraient conduire à la remontée du mélange du ballon vers le tube réfrigérant.
- 2**
- (a) La pression interne de l'ampoule à décanter peut augmenter suite à l'évaporation des solvants. Pour rééquilibrer la pression intérieure avec la pression extérieure, il faut ouvrir le robinet de temps à autre, l'ampoule étant inclinée de manière à ce que le mélange liquide soit en contact avec son bouchant, et qu'il n'y ait pas de liquide au niveau du robinet.
Lors du dégazage, on doit veiller à ne pas diriger l'ampoule vers une autre personne, car il existe un risque de projection.
 - (b) On observe deux phases liquides non miscibles dans l'ampoule à décanter. La phase du haut est la phase organique (celle dont le solvant est le cyclohexane) car la densité du cyclohexane est inférieure à celle de l'eau.
 - (c) L'huile essentielle de lavande étant beaucoup plus soluble dans le cyclohexane que dans l'eau salée, elle est passée en solution dans le cyclohexane lors du mélange. Après séparation des phases, elle est donc dans l'ampoule (tandis que le bécher contient de l'eau salée).

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

- 1** On commence par équilibrer les éléments qui ne figurent que dans un seul réactif et un seul produit. C'est le cas :
- de l'élément carbone (C), qui ne figure que dans l'alcool benzylique (côté réactifs) et dans l'acide benzoïque (côté produits) ;
 - de l'élément manganèse (Mn), qui ne figure que dans les ions permanganate (côté réactifs) et dans le dioxyde de manganèse (côté produits). Comme chaque molécule d'acide benzoïque et chaque molécule d'alcool benzylique possède sept atomes de carbones, on voit qu'il faut ajouter le coefficient stœchiométrique 3 devant l'alcool benzylique. De la même manière on voit qu'il faut ajouter le coefficient stœchiométrique 4 devant le dioxyde de manganèse. Il nous faut également ajouter le coefficient stœchiométrique 4 devant les ions H^+ , de telle manière que la charge totale des réactifs et des produits soit la même (à savoir ici zéro). Une fois que ceci est fait on doit finalement équilibrer la quantité de matière en atomes d'hydrogène et d'oxygène, en ajustant le coefficient stœchiométrique de l'eau H_2O dans les produits. On voit que celui-ci doit être égal à cinq, pour que l'on ait 28 atomes d'hydrogène de part et d'autre, et 19 atomes d'oxygène. On obtient en définitive :
- $$3\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH} + 4\text{MnO}_4^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 3\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2\text{H} + 5\text{H}_2\text{O} + 4\text{MnO}_2$$
- 2** À l'état initial, le système ne contient que les réactifs de la réaction. On voit ainsi, par une lecture verticale à t_0 , que le chromatogramme est identique à celui du réactif pur, donné par une lecture verticale au-dessus de « R ».
- 3** Le temps augmente lorsqu'on se déplace vers la droite sur le chromatogramme ($t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6$). On voit qu'au cours du temps, la tache correspondant au réactif R (ligne supérieure) devient plus ténue, jusqu'à disparaître : la quantité de réactif diminue au cours du temps.
- 4** On peut déceler la présence de produit dans le mélange à la date t_1 : une lecture verticale du chromatogramme à cette date montre une tache ténue ayant le rapport frontal du produit.
- 5** Une heure et demie correspond à six fois quinze minutes, soit la date t_6 . On voit que le réactif n'est plus décelable dès la date t_5 , il n'est donc pas nécessaire d'attendre une heure et demie pour arrêter le chauffage : une heure et quinze minutes suffisent pour rendre le réactif indécelable.

9

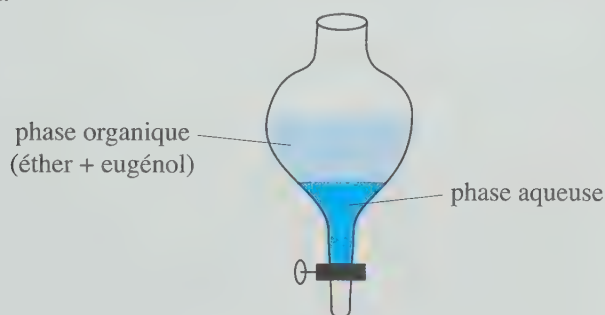
Extraction de l'eugénol

Enoncé
p. 240

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

- 1 Sa formule brute est $C_{10}H_{12}O_2$.
- 2 L'eugénol doit être plus soluble dans le solvant extracteur que dans l'eau. En outre le solvant extracteur doit être non miscible avec l'eau, de manière à pouvoir séparer le solvant de la phase aqueuse.
- 3 Les critères ci-dessus indiquent que l'on doit utiliser l'éther pour extraire l'eugénol de la solution aqueuse.
- 4 Le pictogramme de sécurité indiqué sur la bouteille d'éther signifie « inflammable ou extrêmement inflammable ». Il faut veiller à le manipuler loin de toute flamme ou source d'étincelles.
- 5 L'éther n'étant pas miscible à l'eau, on obtient deux phases dans l'ampoule à décanter à l'issue de l'expérience : la phase aqueuse (qui contient l'eau) et la phase organique (qui contient l'éther).

Puisque ce dernier est moins dense que l'eau, la phase organique se trouve au-dessus de la phase aqueuse, comme indiqué sur le schéma suivant.



10 Enquête policière

Enoncé
p. 241

Lycée Lakanal, Sceaux

- 1 Les ions contenus dans l'hydroxyde de sodium sont les ions hydroxyde (HO^-) et le ions sodium (Na^+).

Les ions contenus dans le nitrate d'argent sont les ions nitrate (NO_3^-) et les ions argent (Ag^+).

Les ions contenus dans le chlorure de baryum sont les ions chlorure (Cl^-) et les ions baryum (Ba^{2+}).

- 2 Nous obtenons le tableau suivant :

Zone	1	2	3	4	5	6	7	8
Cation	Zn^{2+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Cu^{2+}	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Zn^{2+}	Cu^{2+}
Anion	SO_4^{2-}	Cl^-	Cl^-	SO_4^{2-}	SO_4^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Cl^-

- 3 Le précipité blanc qui noircit à la lumière est un précipité de chlorure d'argent. Il révèle la présence d'ions chlorure dans la solution de la poudre A.

- 4 Le précipité blanc obtenu avec l'hydroxyde de sodium est un précipité d'hydroxyde de zinc. La solution de la poudre A contient des ions zinc.

- 5 L'absence de précipité lorsque l'on ajoute la solution de chlorure de baryum permet d'écarter la présence des anions sulfate. Le précipité de couleur rouille obtenu par adjonction de la solution d'hydroxyde de sodium est un précipité d'hydroxyde de fer (III). D'après le tableau obtenu à la question 2, il pourrait s'agir de la zone 3 ou de la zone 5, qui toutes deux correspondent à l'ion fer (III). Toutefois, l'ion sulfate est présent dans la zone 5, et n'est pas détecté par le test avec le chlorure de baryum. Nous pouvons donc conclure que la poudre B provient de la zone 3.

- 6 La solution de la poudre A contient les ions zinc (II) et chlorure. Elle provient donc de la zone 7. La seule personne ayant à la fois accès aux zones 3 et 7 est M. Albert DUPONT, qui est donc le suspect numéro 1.

Les éléments chimiques. Structure de l'atome

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Abondance des éléments chimiques
3. Structure de l'atome d'hydrogène
4. Structure des autres atomes
5. Ions monoatomiques

Thèmes : la santé, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Picpus, Paris

On considère un atome de l'isotope ${}^{60}_{27}\text{Co}$ du cobalt.

- 1 Quel est son nombre de nucléons ?
- 2 Quel est son numéro atomique ?
- 3 Combien de neutrons son noyau contient-il ?
- 4 Combien d'électrons orbitent autour de ce noyau ?

Voir corrigé page 254

2 Abondance des éléments chimiques

Tous les objets de l'Univers ne sont composés que d'un petit nombre d'*éléments chimiques* (environ une *centaine*).

Le plus abondant est de loin l'*hydrogène*, qui, en masse, représente les trois quarts de tous les éléments. Le deuxième par ordre d'abondance est l'*hélium*, qui représente en masse la quasi-totalité du quart restant. Tous les autres éléments (*carbone*, *azote*, *oxygène*, *néon*, etc.) se partagent les quelques pourcentages restants.

Sur *Terre*, ces rapports d'abondance sont modifiés par le fait que la Terre n'a pas pu retenir, lors de sa formation, les éléments les plus légers qui étaient volatils et ont quitté l'atmosphère initiale. En particulier elle n'a pu retenir l'hydrogène H que dans l'eau H_2O .

La *croûte terrestre* est composée, quant à elle, essentiellement de *silicium* et d'*oxygène*.

Structure de l'atome d'hydrogène

L'atome d'hydrogène est le plus simple qui soit. Il est composé d'un *proton*, de charge électrique $q_e = +1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, où C est le symbole du coulomb (unité de charge dans le Système International) et de masse $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, et d'un *électron* de charge électrique négative, opposée à celle du proton, et de masse $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

L'atome d'hydrogène est donc *électriquement neutre*, c'est-à-dire que sa charge électrique totale est nulle, puisque les charges respectives du proton et de l'électron s'annulent. On constate également que le proton est environ 1 800 fois plus *massif* que l'électron, donc l'essentiel de la masse de l'atome d'hydrogène est concentrée dans le proton.

Une représentation simplifiée de l'atome d'hydrogène, le *modèle de Bohr*, consiste à dire que le proton occupe la place centrale (le noyau), et que l'électron *orbite* autour du proton, un peu comme une planète orbite autour du Soleil. La distance entre le proton et l'électron est dans le modèle de Bohr égale à $5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$ (ou $5,29 \times 10^{-2} \text{ nm}$, où nm est le symbole du *nanomètre*, qui représente 10^{-9} m). Ce modèle est une vue de l'esprit, et la *Mécanique Quantique* enseigne qu'il faut renoncer à une telle description de l'atome, où l'on applique les concepts du monde à notre échelle aux objets de l'infiniment petit. Ainsi, au lieu de parler de l'orbite de l'électron, on préfère parler du *nuage électronique*, qui représente la région de l'espace entourant le noyau où l'on est susceptible de trouver l'électron.

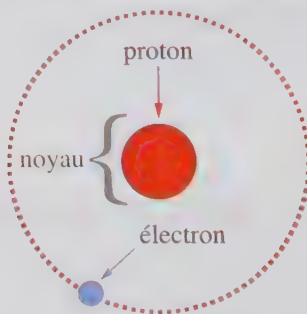


Figure 10.1 – *Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène.*

4 Structure des autres atomes

La structure des autres atomes s'inscrit dans la lignée de celle de l'atome d'hydrogène.

Le *noyau* d'un atome contient des *protons*, comme celui qui constitue le noyau de l'atome d'hydrogène, et des *neutrons*, qui sont des particules *neutres*, c'est-à-dire de charge électrique nulle, et de masse pratiquement égale à celle du proton. Protons et neutrons sont appelés *nucléons*, puisque ce sont les particules qui constituent le noyau.

Autour du noyau, on a comme pour l'atome d'hydrogène un *nuage* électronique, qui contient autant d'électrons qu'il y a de protons dans le noyau. L'atome est donc globalement électriquement neutre.

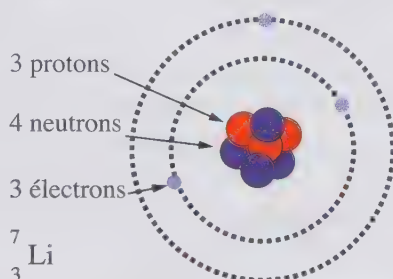


Figure 10.2 – Modèle de Bohr de l'atome de lithium 7.

À RETENIR

On appelle *numéro atomique*, et on note Z , le nombre de protons qu'il y a dans le noyau.

On appelle *nombre de nucléons* (autrefois appelé *nombre de masse*), et on note A , le nombre total de nucléons (neutrons et protons) qu'il y a dans le noyau.

En particulier, on remarquera que le noyau contient $A - Z$ neutrons.

Pour désigner un élément chimique, on utilise son symbole X , *précédé* en *exposant* du nombre de nucléons, et en *indice* du numéro atomique, de la manière suivante :



Ainsi, l'atome d'hydrogène que nous avons étudié à la section précédente est représenté par ${}^1_1\text{H}$.

Le numéro atomique est caractéristique de l'*élément chimique*. Ainsi, au numéro atomique 1 correspond l'hydrogène, au numéro atomique 2 correspond l'hélium, etc.

On appelle *isotopes* deux atomes qui ont le même numéro atomique et un nombre de nucléons différent. Ainsi, deux isotopes ont même nombre de protons mais

diffèrent par leur nombre de neutrons.

Les éléments que l'on rencontre le plus fréquemment au niveau de la classe de Seconde sont :

- le carbone (C)
- l'hydrogène (H)
- l'oxygène (O)
- l'azote (N)

5 Ions monoatomiques

Un *ion monoatomique* correspond à un atome qui a gagné ou perdu un ou plusieurs *électrons*. La charge de son nuage électronique ne s'annule donc plus avec celle de son noyau et l'ion est *électriquement chargé*.

Un atome qui a *gagné* un ou plusieurs électron(s) correspond à un ion chargé *négativement*, ou *anion*.

Un atome qui a *perdu* un ou plusieurs électron(s) correspond à un ion chargé *positivement*, ou *cation*.

Solution de l'exercice type

Lycée Picpus, Paris

- 1 Son nombre de nucléons est le nombre indiqué en haut à gauche donc :
 $A = 60$.
- 2 Son numéro atomique est le nombre indiqué en bas à gauche donc :
 $Z = 27$.
- 3 Le nombre de nucléons est égal au nombre total de nucléons dans le noyau. On appelle N le nombre de neutrons, on a Z protons dans le noyau, donc :

$$A = N + Z \quad \text{soit : } N = A - Z = 60 - 27 = 33.$$

Il y a trente trois neutrons dans le noyau.

- 4 La neutralité électrique de l'atome implique qu'il contient autant d'électrons que de protons donc 27 électrons orbitent autour du noyau.

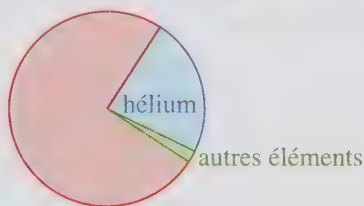
Voir énoncé page 251

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

➔ **Corrigé**
p. 258

- 1** Quelle particule élémentaire est beaucoup plus légère qu'un proton ?
- a** Le neutron **b** L'électron
- 2** Parmi la liste d'atomes suivante, lesquels sont des isotopes de $^{12}_6\text{C}$?
- a** $^{14}_7\text{N}$ **b** $^{59}_{27}\text{Co}$
- c** $^{13}_6\text{C}$ **d** $^{63}_{29}\text{Cu}$
- e** $^{14}_6\text{C}$
- 3** *Vrai ou Faux ?*
- (a)** Dans un noyau il y a le même nombre de neutrons que de protons.
- (b)** Le nuage électronique d'un atome neutre contient autant d'électrons qu'il y a de protons dans le noyau.
- (c)** La masse d'un atome est essentiellement concentrée dans son noyau.
- (d)** La masse d'un neutron est très supérieure à celle d'un proton.
- 4** Le diagramme circulaire (en *camembert*) ci-dessous représente l'abondance des éléments, en masse, dans l'Univers. Que faut-il mettre dans la partie sans légende (orange clair) ?

Figure 10.3 – *Abondance des éléments dans l'Univers*

- a** Eau **b** Terre
- c** Hydrogène **d** Carbone
- 5** Trouver l'intrus dans la liste ci-dessous.
- a** Carbone **b** Cuivre
- c** Mercure **d** Hélium
- e** Air **f** Uranium

Chercher l'intrus

5 min

➔ **Corrigé**
p. 258

Lycée Van Dongen, Lagny

Identifier les corps qui ne sont pas des éléments chimiques :

- cuivre
- fer
- sucre
- eau
- fonte
- uranium

3 Atome de phosphore



15 min

Corrigé
p. 258

Lycée François Mauriac, Bordeaux

L'atome de phosphore a pour symbole $^{31}_{15}\text{P}$.

- Donner le nombre de protons (p), de neutrons (n) et d'électrons (e^-) d'un atome de $^{31}_{15}\text{P}$.
- Calculer la masse d'un atome de $^{31}_{15}\text{P}$.
- On utilise souvent la relation suivante pour calculer la masse d'un atome :

$$M = A \times m_n.$$

Calculer la masse d'un atome de $^{31}_{15}\text{P}$ en utilisant cette relation.

- Quelles sont vos remarques ? Expliquez pourquoi, d'après vous, on appelait autrefois A le nombre de masse.
- Quelle est la charge électrique du nuage électronique de l'atome de $^{31}_{15}\text{P}$?

Données : $m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ • $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $m_{e^-} = 9,110 \times 10^{-31} \text{ kg}$ • $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Modèle de l'atome d'hydrogène



10 min

Corrigé
p. 259

Lycée Auguste Renoir, Limoges

On considère que le rayon de l'atome d'hydrogène (rayon de Bohr) est de $r_H = 53 \text{ pm}$, tandis que le rayon de son noyau est $r_N = 0,88 \text{ fm}$. On souhaite modéliser cet atome en représentant son noyau par un ballon de football de diamètre $d = 20 \text{ cm}$. À quelle distance de celui-ci faut-il placer l'électron ?

Données : $\bullet$ Le préfixe pico (de symbole p), correspond à 10^{-12}
 $\bullet$ Le préfixe femto (de symbole f), correspond à 10^{-15}

5 Modèle de l'atome d'hydrogène



15 min

Corrigé
p. 259

Lycée Monod, Clamart

- L'atome d'hydrogène étudié est composé :
 - d'un noyau contenant un proton,
 - d'un nuage électronique situé autour du noyau contenant un électron.
 Représenter le noyau de cet atome par un symbole.
- On suppose que l'électron, dans l'atome isolé, a 90 % de chance d'être contenu à l'intérieur d'une sphère dont le diamètre est $d = 2,8 \times 10^{-10} \text{ m}$. On suppose également que le noyau est une sphère dont le diamètre a pour mesure $d' = 2,0 \times 10^{-15} \text{ m}$.
 - On veut représenter un modèle (S_1) de la sphère dans laquelle l'électron est pratiquement contenu. Si l'on choisit, comme modèle du noyau, une balle de tennis dont le diamètre est $d'_1 = 67 \text{ mm}$, calculer le diamètre d_1 de la sphère (S_1).

(b) Est-ce que le modèle de l'atome est réalisable ? Que conclure au sujet de la structure de l'atome d'hydrogène, si l'on prend, comme représentation du modèle d'un électron, une petite boule 10^8 fois plus petite que le modèle de l'atome d'hydrogène ?

3 (a) Le modèle du noyau est une balle de tennis dont la masse est $M_p = 58$ g. Quelle doit être la masse M du modèle de l'électron ? On donne :

- masse de l'électron : $m_{e^-} = 9,1 \times 10^{-31}$ kg
- masse du proton : $m_p = 1,7 \times 10^{-27}$ kg

(b) Que conclure au sujet de la distribution des masses dans l'atome d'hydrogène ?



Chaîne en or



15 min

Corrigé
p. 260

Lycée Monod, Clamart

Une chaîne en or pur a une masse totale $m = 31,5$ grammes. Elle est constituée de $n = 105$ maillons identiques.

Sachant que l'élément or a pour symbole $^{197}_{79}\text{Au}$, calculer :

- 1 la masse m_M d'un maillon
- 2 Le nombre de neutrons contenus dans un atome d'or
- 3 La masse d'un atome d'or
- 4 Le nombre N d'atomes d'or contenus dans chaque maillon

Données : Masses des particules élémentaires :

- $m_{e^-} = 9,109 \times 10^{-31}$ kg
- $m_p = 1,672 \times 10^{-27}$ kg
- $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ kg

1 QCM Testez vos connaissances

➔ **Enoncé**
p. 255

- 1 **b**. L'électron est environ 1 800 fois plus léger que le proton.
- 2 **c** et **e**. Il doit s'agir du même élément chimique.
- 3 (a) *Faux*. On regardera par exemple l'exercice sur la chaîne en or.
(b) *Vrai*. Pour assurer la neutralité électrique globale de l'atome.
(c) *Vrai*. (Voir le 1.)
(d) *Faux*. Leurs masses sont sensiblement égales.
- 4 **c**. L'hydrogène est de loin l'élément le plus abondant dans l'Univers.
- 5 **e**. C'est le seul qui ne soit pas un élément chimique.

2 Chercher l'intrus

➔ **Enoncé**
p. 255

Lycée Van Dongen, Lagny

L'eau n'est pas un élément chimique. Sa formule chimique H_2O , bien connue, exprime qu'elle est composée des éléments hydrogène et oxygène.

La fonte n'est pas un élément chimique. C'est un alliage qui fait intervenir plusieurs métaux.

Enfin le sucre n'est pas un élément chimique. C'est en fait un corps de structure très complexe, formé à partir des éléments oxygène, carbone, et hydrogène.

Tous les autres corps cités sont des éléments chimiques.

3 Atome de phosphore

➔ **Enoncé**
p. 256

Lycée François Mauriac, Bordeaux

- 1 Le nombre de protons est $Z = 15$, celui de neutrons est égal au nombre de nucléons moins le nombre de protons, c'est-à-dire $A - Z = 31 - 15$, soit $A - Z = 16$, et le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, 15, pour assurer la neutralité électrique de l'atome.
- 2 La masse est égale à la masse des 16 neutrons, 15 protons et 15 électrons, soit :

$$m = 16m_n + 15m_p + 15m_e^-.$$

L'application numérique donne :

$$m = 5,19 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- 3 En utilisant cette relation, on trouve :

$$m = 31 \times 1,675 \times 10^{-27} = 5,19 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- 4 On retrouve donc bien la même chose. En fait, c'est normal puisque la masse des électrons est négligeable et que la masse du proton et celle du neutron est pratiquement la même. Notons la m_N , N comme nucléon. La masse de l'atome est celle des Z protons et $A - Z$ neutrons, c'est-à-dire

$$m = Zm_N + (A - Z)m_N = Am_N,$$

ce qui justifie la formule de l'énoncé. À un encore plus grand niveau de précision, on peut constater que la masse du neutron est pratiquement égale à celle du proton plus celle de l'électron, ce qui justifie, si on prend en compte la masse du nuage électronique, le fait qu'on doit multiplier A par la masse du neutron.

Ainsi, on justifie l'ancienne appellation de nombre de masse pour le nombre A puisque la masse de l'atome est obtenue en multipliant A par une constante indépendante de l'élément considéré.

- 5 La charge électrique du nuage électronique est 15 fois la charge électrique de l'électron, qui est $-e$, donc la charge recherchée est :

$$q = -15e = -2,4 \times 10^{-18} \text{ C}.$$

4 Modèle de l'atome d'hydrogène

➔ Enoncé
p. 256

Lycée Auguste Renoir, Limoges

Le modèle souhaité a une taille d/r_N fois plus grande que l'original. Appelons K ce rapport. Il vaut :

$$K = \frac{d}{r_N} = \frac{0,20}{0,88 \times 10^{-15}} = 2,3 \times 10^{14}.$$

Il faut donc placer le modèle de l'électron à une distance D du modèle du ballon de football donnée par :

$$D = Kr_H = 2,3 \times 10^{14} \times 53 \times 10^{-12} = 1,2 \times 10^4 \text{ m}.$$

Le modèle de l'électron doit donc être placé à 12 km du modèle du noyau.

5 Modèle de l'atome d'hydrogène

➔ Enoncé
p. 256

Lycée Monod, Clamart

- 1 Le noyau de l'hydrogène est obtenu en enlevant un électron à l'atome d'hydrogène. C'est donc l'ion H^+ . Notons que le proton est également habituellement désigné dans la littérature par la lettre p .

- 2 (a) On représente l'atome par un modèle qui lui est homothétique avec

$$\text{un rapport d'homothétie } K = \frac{67 \times 10^{-3}}{2,0 \times 10^{-15}} = 3,35 \times 10^{13}.$$

On garde trois chiffres significatifs puisque le dernier est un cinq, et pour éviter l'accumulation des erreurs d'arrondi. Le diamètre du modèle est donc $K = 3,35 \times 10^{13}$ fois plus grand que le diamètre de la sphère contenant l'électron — avec 90 % de chances :

$$d_1 = K \times d = 9,400 \times 10^3 \text{ m} = 9,4 \text{ km}.$$

- (b) Bien évidemment, un tel modèle est irréalisable.
Le diamètre du modèle de l'électron serait :

$$\frac{9,4 \times 10^3}{10^8} = 94 \times 10^{-6} \text{ m} = 94 \text{ } \mu\text{m}.$$

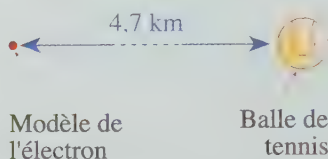


Figure 10.4 – *Modèle de l'atome d'hydrogène.*

On peut en déduire que l'atome d'hydrogène est essentiellement vide, et que l'espace décrit par l'électron est considérablement plus grand que celui occupé par le noyau.

- 3 (a) Le rapport de la masse de l'électron à la masse du noyau est :

$$K' = \frac{m_{e^-}}{m_p} = 5,35 \times 10^{-4},$$

donc la masse M du modèle de l'électron devrait être :

$$M = 5,35 \times 10^{-4} \times 58 = 3,1 \times 10^{-2} \text{ g} = 31 \text{ mg}.$$

- (b) On en déduit que l'essentiel de la masse de l'atome d'hydrogène est concentrée dans le noyau.

6 Chaîne en or

Enoncé
p. 257

Lycée Monod, Clamart

- 1 La masse d'un maillon est la masse de la chaîne divisée par le nombre de maillons, c'est-à-dire :

$$m_M = \frac{m}{n} = \frac{31,5}{105} = 0,300 \text{ g}.$$

- 2 Dans un atome d'or il y a $N = A - Z = 197 - 79 = 118$ neutrons.

- 3 La masse d'un atome d'or est égale à la somme des masses des protons, des neutrons et des électrons :

$$m_{\text{Au}} = Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_{e^-} = 3,30 \times 10^{-25} \text{ kg}.$$

- 4 Le nombre d'atomes d'or est égal à la masse d'or dans un maillon divisée par la masse d'un atome d'or :

$$N = \frac{m_M}{m_{\text{Au}}} = \frac{3,00 \times 10^{-4}}{3,30 \times 10^{-25}} = 9,09 \times 10^{20}.$$

Il y a environ 10^{21} atomes d'or dans un maillon.

Il faut prendre garde à exprimer la masse d'un maillon et celle d'un atome dans les mêmes unités (ici le kilogramme) à la question finale.

La classification périodique

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Règle de l'octet et du duet pour les ions monoatomiques

Thèmes : la santé, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Français, Londres

Donner le numéro atomique et la place dans la classification périodique de l'atome dont la configuration électronique est la suivante :

$$(K)^2(L)^8(M)^3$$

Voir corrigé page 264

Le chapitre précédent avait permis d'introduire les notions de numéro atomique et de nombre de nucléons. Ici, nous voyons comment le nuage électronique est structuré en couches autour du noyau.

2 Définitions

2.1 Les couches électroniques

Le *nuage électronique* mentionné à la section précédente est structuré en *couches* d'énergies différentes, désignées, par ordre d'énergie croissante, par les lettres K , L , M , etc.

Définition 1

La configuration électronique d'un atome ou d'un ion est spécifiée par le nombre d'électrons que contient chacune des couches électroniques.

Pour donner la configuration électronique d'un atome ou d'un ion, on remplit les couches à concurrence du nombre d'électrons, en commençant par la couche K . La couche K peut contenir au maximum deux électrons, la couche L peut en contenir huit. Cette méthode est valable pour les éléments ayant $Z < 19$.

2.2 La classification périodique

La classification périodique, également appelée *tableau de Mendeleïev*, est liée à la façon dont on remplit les couches.

Le tableau complet se trouve en annexe en fin d'ouvrage, page 399.

Pour les trois premières lignes du tableau, chaque ligne est associée à une couche. Les lignes sont aussi appelées des périodes.

Dans chaque ligne les éléments sont rangés par numéro atomique croissant. Lorsqu'une couche est complète, on va à la ligne et on décale éventuellement afin que les éléments sur une même colonne aient des propriétés chimiques similaires.

- La première colonne, qui contient par exemple l'hydrogène et le sodium, est la colonne des *alcalins* (à l'exception de l'hydrogène, qui n'est pas formellement un alcalin). Ces éléments n'ont qu'un électron sur leur dernière couche, et ils le perdent facilement pour donner les cations H^+ , Na^+ , etc.
- La dernière colonne, qui contient l'hélium, le néon, l'argon, etc. est la colonne des *gaz rares* ou *gaz nobles*. Les éléments de cette colonne ont leur dernière couche complète, et ils sont chimiquement inertes.
- Les éléments de l'avant-dernière colonne sont les *halogènes*. Il leur manque un électron sur leur dernière couche, ils peuvent facilement l'acquérir pour se retrouver dans la configuration électronique du gaz rare immédiatement suivant. Ils deviennent ainsi des anions portant une charge élémentaire. Les ions F^- , Cl^- , Br^- en sont des exemples.

Alcalins				Gaz nobles			
				Halogènes			
1 H Hydrogène 1,0							4 He Hélium 4,0
7 Li Lithium 6,9	9 Be Béryllium 9,0	11 B Bore 10,8	12 C Carbone 12,0	14 N Azote 14,0	16 O Oxygène 16,0	19 F Fluor 19,0	20 Ne Néon 20,2
23 Na Sodium 23,00	24 Mg Magnésium 24,3	27 Al Aluminium 27,0	28 Si Silicium 28,1	31 P Phosphore 31,0	32 S Soufre 32,1	35 Cl Chlore 35,5	40 Ar Argon 39,9

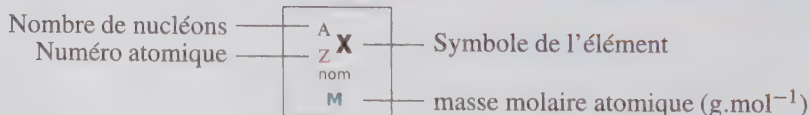


Figure 11.1 – Classification périodique des éléments jusqu'à $Z = 18$.

2.3 Détermination de la configuration électronique d'un atome

2.3.1 - Population des couches électroniques

À chaque niveau d'énergie ou couche mentionnés aux sections précédentes est associé un nombre noté n . La couche de plus basse énergie a le nombre $n=1$. Ainsi $n=1 \Leftrightarrow$ couche K , $n=2 \Leftrightarrow$ couche L , etc. Le nombre maximal d'électrons que peut contenir la couche n est $2n^2$. Ainsi la couche K contient au maximum $2 \times 1^2 = 2$ électrons, la couche L au maximum $2 \times 2^2 = 8$, la couche M au maximum $2 \times 3^2 = 18$, etc.

2.3.2 - Détermination d'une configuration électronique

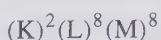
Pour connaître la configuration électronique d'un atome ou d'un ion, on commence par évaluer le nombre d'électrons qu'il faut placer dans les couches. Ce nombre vaut Z dans le cas d'un atome neutre, et peut être plus grand ou plus petit que Z selon que l'on a affaire à un anion ou à un cation. Une fois que ce nombre est connu, on remplit les couches de la manière suivante (seuls les cas où $Z < 19$ sont au programme) :

- 1** On remplit par ordre d'énergie croissante. On remplit complètement une couche avant d'en changer.
- 2** On arrête le processus quand le nombre total d'électrons est atteint.

Exemple : On se propose de déterminer la configuration électronique de l'atome d'azote ($Z = 7$). On commence par compléter la couche (K) avec les 2 électrons qu'elle peut contenir :

Il reste encore cinq électrons à répartir, dans les couches suivantes. La couche (L) peut contenir 8 électrons, donc elle contient tous les électrons qu'il reste à répartir. La configuration électronique de l'atome d'azote est donc $(K)^2(L)^5$.

Exemple : On cherche la configuration électronique de l'ion chlorure Cl^- . Le numéro atomique de l'élément fluor est $Z = 17$, donc son noyau possède 9 protons. Puisque l'ion porte une charge négative, il a au total un électron de plus que de protons : il possède 18 électrons au total, que nous devons répartir dans les différentes couches électroniques. Nous commençons par remplir la couche K , avec deux électrons. Il en reste 16 à répartir. La couche suivante (L) peut en contenir 8. Il en reste donc finalement 8, que nous répartissons dans la couche (M). La configuration électronique de l'ion chlorure est donc :



3 Règle de l'octet et du duet pour les ions monoatomiques

La règle de l'octet ou du duet indique qu'un ion monoatomique a tendance à adopter la configuration électronique du gaz noble le plus proche dans la classification périodique. Pour les éléments les plus légers (hydrogène, lithium, etc.), le gaz noble le plus proche dans la classification périodique est l'hélium, qui possède deux électrons sur sa couche externe. C'est la raison pour laquelle on parle alors de règle du duet. Les gaz nobles autre que l'hélium ont tous 8 électrons sur leur couche externe, raison pour laquelle on parle alors de règle de l'octet.

La règle de l'octet permet d'expliquer le comportement mentionné à la section 2.2. Les différentes familles de la classification périodique gagnent ou perdent des électrons de manière à satisfaire la règle de l'octet.

Solution de l'exercice type

Lycée Français, Londres

Le nombre total d'électrons dans cet atome est $2 + 8 + 3 = 13$. Le numéro atomique de cet atome est donc : $Z = 13$, puisque le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, l'atome étant électriquement neutre. La couche de valence est la troisième, M , donc l'élément se trouve sur la troisième ligne de la classification périodique. Cette couche contient 3 électrons donc l'élément se trouve à la colonne III. C'est l'aluminium.

Voir énoncé page 261

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 271

- 1** Vrai ou Faux ?
- ☐ a Les éléments sont rangés dans le tableau périodique par nombre de nucléons croissant.
 - ☐ b Chaque ligne du tableau périodique est appelée période.
 - ☐ c La couche numéro n peut contenir au maximum $2n$ électrons.
 - ☐ d La couche (L) correspond au nombre quantique $n = 2$.
- 2** Quelle est la configuration électronique d'un atome de carbone ($Z = 6$) ?
- ☐ a $(K)^2(L)^6$ ☐ b $(K)^2(Z)^6$ ☐ c $(K)^2(L)^4$ ☐ d $(K)^4(L)^2$
- 3** Les éléments de la première colonne appartiennent
- ☐ a à la même période ☐ b à la même couche
- ☐ c à la même famille
- 4** Pour acquérir la configuration électronique du gaz noble le plus proche, un atome doit se débarrasser de deux électrons. Ce faisant, il va acquérir :
- ☐ a Une charge positive ☐ b une charge négative
- 5** Le sodium Na, de numéro atomique $Z = 11$, a pour structure électronique $(K)^2(L)^8(M)^1$. Il va donc former l'ion :
- ☐ a Na^{2+} ☐ b Na^+ ☐ c Na^{2-} ☐ d Na^-

2 V/F Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 271

- 1** La configuration électronique fait apparaître les couches électroniques internes.
- 2** Deux isotopes diffèrent seulement par leur nombre de neutrons et donc leurs configurations électroniques sont identiques.
- 3** Un gaz noble a forcément un nombre pair d'électrons sur sa couche externe.
- 4** Un atome qui a un nombre pair d'électrons sur sa couche externe est forcément un gaz noble.

3 Éléments chimiques

5 min

Corrigé
p. 271**Lycée Hoche, Versailles**

- 1** Nommer les éléments chimiques correspondant aux symboles suivants :
- (a) N, Na, Hg, Mg, He, Ar Azote, Sodium, Mercure, Magnésium, Hélium, Argon
- (b) O, C, F, P, S. Oxygène, Carbone, Fluor, Phosphore, Soufre
- 2** Donner les symboles des éléments suivants :
- Zinc, or, baryum, argent, aluminium, plomb, silicium.
- Zn Au Ba Ag Al Pb Si

4 Étiquette de boisson minérale



5 min

Corrigé
p. 272

Lycée Jacques Decour, Paris

L'étiquette d'une eau minérale comporte les indications suivantes :

- Calcium (Ca^{2+}) *anion cation* 533 mg/L
- Magnésium (Mg^{2+}) *cation* 66 mg/L
- Potassium (K^+) *cation* 2 mg/L
- Sodium (Na^+) *cation* 1 mg/L
- Sulfates (SO_4^{2-}) *anion* 1420 mg/L
- Bicarbonates (HCO_3^-) *anion* 176 mg/L
- Nitrates (NO_3^-) *anion* < 2 mg/L
- Fluorures (F^-) *anion* < 1 mg/L
- Chlorures (Cl^-) < 1 mg/L

- 1 Classer les ions suivant leur nature (anion ou cation). Justifier brièvement votre réponse.
- 2 Préciser ce qu'est un ion monoatomique et établir la liste des ions monoatomiques contenus dans cette eau minérale.
- 3 Relever tous les ions contenant des éléments chimiques de la famille des métaux alcalins. Justifier brièvement votre réponse.
- 4 Préciser à quelle famille d'éléments appartient l'ion fluorure.

5 Configuration électronique de l'azote ★

5 min

Corrigé
p. 272

Lycée Montplaisir, Valence

Quelle est la configuration électronique correcte de l'atome d'azote (dont le numéro atomique est $Z = 7$) ?

1 $(\text{K})^2(\text{L})^4(\text{M})^1$

2 $(\text{K})^2(\text{L})^5$

3 $(\text{K})^2(\text{L})^7$

6 Testez vos connaissances



5 min

Corrigé
p. 272

Lycée Jules Verne, Nantes

- 1 Qu'est-ce qu'une période ? *une ligne*
- 2 Combien d'électrons la couche électronique de numéro n peut-elle contenir au maximum ? *$2n^2$*
- 3 Quel est le numéro de colonne de la famille :
 - (a) des alcalins ? *1*
 - (b) des halogènes ? *17*
 - (c) des gaz nobles ? *18*

7 Charge d'ions monoatomiques



10 min

Corrigé
p. 273

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

Lorsqu'il s'ionise en perdant ou acquérant un ou plusieurs électrons, un atome a tendance à acquérir la configuration électronique du gaz noble le plus proche dans la classification périodique.

- 1 Donner la configuration électronique des atomes de chlore, de magnésium, de lithium et de fluor.
- 2 En déduire la configuration électronique des ions que peuvent former chacun de ces atomes.
- 3 Quelle est la charge de chacun des ions correspondants ?

Données :

Les numéros atomiques des atomes, dans l'ordre de l'énoncé, sont respectivement : 17, 12, 3 et 9.

8 Structure atomique



5 min

Corrigé
p. 274

Lycée Janson de Sailly, Paris

Un atome a la configuration électronique suivante : $(K)^2(L)^8(M)^3$.

- 1 Quel est son numéro atomique ? 11
- 2 Quelle est sa place dans la classification périodique ? (on donnera sa ligne et sa position sur la ligne). 3^e ligne 1^{er} post
- 3 Sachant que son noyau comporte 14 neutrons, quelle est la masse de cet atome ? $11 + 14 = 25$ $25 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Donnée : masse du neutron : $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

9 Atome de carbone



10 min

Corrigé
p. 274

Lycée Lacroix, Maisons-Alfort

On étudie l'atome de carbone 13 : $^{13}_6\text{C}$.

- 1 Compléter la phrase suivante : l'atome de carbone 13 ($^{13}_6\text{C}$) est un de l'atome de carbone 12 ($^{12}_6\text{C}$).
- 2 Combien l'atome de $^{13}_6\text{C}$ contient-il de protons ? De nucléons ? De neutrons ? 7 0 22
- 3 Combien contient-il d'électrons ? 7
- 4 Rappeler la formule approchée qui donne la masse d'un atome en fonction de son nombre de nucléons A et de la masse d'un neutron m_n . Faire l'application numérique dans le cas du carbone $^{13}_6\text{C}$.

$$A \times m_n$$

$$13 \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

- 5** (a) Calculer la masse de l'ensemble des protons dans un atome de carbone 13.
 (b) Calculer la masse de l'ensemble des neutrons dans un atome de carbone 13.
 (c) Calculer la masse de l'ensemble des électrons dans un atome de carbone 13.
 (d) À partir des résultats du (a), (b) et (c), retrouver la masse d'un atome de carbone 13.
- 6** Quelle est la configuration électronique d'un atome de carbone 13 ?

Données :

- $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$ kg.
- $m_p = 1,672 \times 10^{-27}$ kg.
- $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ kg.

10 Identification d'un élément

★★

5 min

Corrigé
p. 275

Lycée Thiers, Marseille

Un élément se trouve, dans la classification périodique, en 6^e position de la 2^e période.

- 1** Déduire la configuration électronique de l'atome correspondant.
Justifier. *(K)²(L)⁶*
- 2** Quel est cet élément ?
ALUMINE - ALUMINE

11 Configuration électronique

★★

5 min

Corrigé
p. 275

Lycée Masséna, Nice

L'atome d'un élément A a trois électrons sur sa couche externe.

- 1** Sachant que cette couche est la couche M, déterminer le numéro atomique de A.
- 2** Donner la configuration électronique complète de A.

12 Identification d'un anion

★★

5 min

Corrigé
p. 276

Lycée Pasteur, Neuilly

Un anion a pour configuration électronique $(K)^2(L)^8(M)^8$. Il porte une seule charge élémentaire.

- 1** Déterminer la configuration électronique de l'atome dont il dérive.
- 2** Déduire la place de cet atome dans la classification. Justifier.

13 Atome d'oxygène

★★

5 min

Corrigé
p. 276**Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne**Soit l'atome d'oxygène ^{16}O .

- 1 Quelle est la constitution du noyau de cet atome ?
- 2 Combien d'électrons l'atome d'oxygène possède-t-il ?
- 3 Établir la configuration électronique de l'atome d'oxygène en utilisant les lettres $K, L, M, \dots$
- 4 L'ion oxygène est O^{2-} , donner la répartition des électrons.

14 Atome de sodium

★★

5 min

Corrigé
p. 276**Lycée Blaise Pascal, Orsay**

L'atome de sodium a pour numéro atomique 11. Son nombre de nucléons est 23.

- 1 Quelle est la constitution de son noyau ?
- 2 Donner la configuration électronique de cet atome, puis de l'ion Na^+ .

15 Configurations électroniques

★★

10 min

Corrigé
p. 277**Lycée Anna Rodier, Moulins**

- 1 Donner la configuration électronique de :
 - (a) l'atome de magnésium ($Z = 12$).
 - (b) l'ion sulfure (le numéro atomique du soufre est 16).
- 2 Donner la configuration électronique de :
 - (a) l'atome de fluor ($Z = 9$).
 - (b) l'ion chlorure (le numéro atomique du chlore est 17).

16 Configuration électronique

★★

10 min

Corrigé
p. 277**Lycée Paul Langevin, Suresnes**

- 1 Compléter le tableau suivant :

Élément	Symbole	Numéro atomique	configuration électronique
Hydrogène		1	
	C		$(K)^2(L)^4$
Oxygène		8	
Soufre		16	

- 2 Justifier la valeur reportée dans le tableau pour le numéro atomique de l'élément carbone.
- 3 Dédire de la configuration électronique d'un atome d'oxygène à quelle période appartient l'élément oxygène, et quelle est sa position sur cette période.
- 4 Parmi les quatre éléments du tableau, indiquer ceux qui appartiennent à la même période et ceux qui appartiennent à la même colonne. Justifier.

17

Identification d'un atome

★★

5 min

Corrigé
p. 278**Lycée Stanislas, Paris**

- 1 Un atome a la configuration électronique suivante : $(K)^2(L)^7$.
Quelle est sa place dans la classification périodique ? (on donnera sa période et sa position dans la période, en justifiant).
- 2 Sachant que le noyau de cet atome comporte 8 neutrons, quelle est la masse de cet atome ?

Donnée : masse du neutron : $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ kg.

1 QCM Testez vos connaissancesEnoncé
p. 265

- 1 (a) *Faux*. Ils sont rangés par numéro atomique croissant.
(b) *Vrai*.
(c) *Faux*. Elle peut contenir au maximum $2n^2$ électrons.
(d) *Vrai*.
- 2 [c]. Seules les réponses c et d correspondent à un total de six électrons, mais la réponse d ne respecte pas le nombre maximal d'électrons autorisé dans la couche (K).
- 3 [c]. Les éléments de la première colonne appartiennent à la même famille.
- 4 [a]. Les électrons qu'il perd étant chargés négativement, il acquiert une charge positive.
- 5 [b]. Il va avoir tendance à perdre son unique électron excédentaire de la couche (M).

2 V/F Testez vos connaissancesEnoncé
p. 265

- 1 *Vrai*. On écrit le contenu électronique de toutes les couches, en commençant par (K), la plus interne.
- 2 *Vrai*. Deux isotopes correspondent au même nombre de protons, et donc au même nombre d'électrons, et leurs configurations électroniques sont par conséquent les mêmes.
- 3 *Vrai*. Un gaz noble a 2 ou 8 électrons sur sa couche externe (règle du duet ou de l'octet). Ce sont des nombres pairs.
- 4 *Faux*. Il suffit pour s'en convaincre de regarder le cas du carbone, dont la configuration électronique, vue à l'exercice précédent, est $(K)^2(L)^4$. Il possède un nombre pair d'électrons sur sa couche externe (4), mais ce n'est pas un gaz noble.

3 Éléments chimiquesEnoncé
p. 265**Lycée Hoche, Versailles**

- 1 (a) Dans l'ordre il s'agit de l'azote, du sodium, du mercure, du magnésium, de l'hélium et de l'argon.
(b) Dans l'ordre il s'agit de l'oxygène, du carbone, du fluor, du phosphore et du soufre.
- 2 Les symboles de ces éléments sont, dans l'ordre, Zn, Au (on parle de minéral *aurifère* quand il contient de l'or), Ba, Ag, Al, Pb, Si.

4 Étiquette de boisson minérale

Enoncé
p. 266

Lycée Jacques Decour, Paris

- 1 Les cations sont les ions portant une charge positive. Ceux présents dans l'eau minérale étudiée sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ .
Les anions sont les ions portant une charge négative. Ceux présents dans l'eau minérale étudiée sont : SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , F^- et Cl^- .
- 2 Un ion monoatomique est un ion correspondant à un seul atome ayant gagné ou perdu des électrons. Les ions monoatomiques présents dans l'eau minérale étudiée sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ (ce sont tous les cations), F^- et Cl^- .
- 3 Les métaux alcalins sont ceux de la première colonne de la classification périodique. Ils possèdent donc un seul électron sur leur couche externe, et ont tendance à s'en débarrasser pour vérifier la règle de l'octet, donnant des cations portant une seule charge élémentaire. Les ions potassium K^+ et sodium Na^+ appartiennent donc à la famille des alcalins.
- 4 L'ion fluorure porte une seule charge élémentaire négative : il a gagné un électron, de manière à satisfaire la règle de l'octet. L'élément fluor doit donc se trouver dans l'avant-dernière colonne de la classification périodique, correspondant à la famille des halogènes.

5 Configuration électronique de l'azote

Enoncé
p. 266

Lycée Montplaisir, Valence

La solution correcte est 2. En effet, le 1. est à proscrire, puisqu'on commence à remplir la couche (*M*) avant d'avoir rempli la couche (*L*) complètement. En outre, la formule 3. contient au total $2 + 7 = 9$ électrons, ce qui ne correspond pas au numéro atomique de l'azote.

6 Testez vos connaissances

Enoncé
p. 266

Lycée Jules Verne, Nantes

- 1 Une période est une ligne du tableau périodique.
- 2 La couche de numéro n peut contenir $2n^2$ électrons au maximum.
- 3 (a) La famille des alcalins correspond à la première colonne de la classification périodique. Elle contient entre autres le lithium, le sodium et le potassium.
(b) La famille des halogènes correspond à l'avant-dernière colonne de la classification périodique. Elle contient en particulier le chlore, le fluor, l'iode, le brome, etc.
(c) La famille des gaz nobles correspond à la dernière (huitième) colonne de la classification périodique. Elle contient entre autres l'hélium, le néon, l'argon, etc.

7 Charge d'ions monoatomiques

Enoncé
p. 267

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

- 1 (a) Donnons une solution détaillée pour le premier cas (atome de chlore). Son numéro atomique est 17, donc il possède 17 électrons.

On rappelle que la n -ième couche électronique peut contenir au maximum $2n^2$ électrons.

Sa couche (K) est donc complète et contient 2 électrons. Il reste à placer $17 - 2 = 15$ électrons sur les couches suivantes. Sa couche (L) peut contenir $2 \times 2^2 = 8$ électrons. Elle est donc complète et il reste : $15 - 8 = 7$ électrons. Ces électrons se retrouvent sur la couche (M), qui peut contenir au maximum $2 \times 3^2 = 18$ électrons. La configuration électronique de l'atome de chlore est donc :

$$(K)^2(L)^8(M)^7$$

De la même manière, on trouve les structures électroniques des atomes suivants :

- (b) Magnésium : $(K)^2(L)^8(M)^2$
 (c) Lithium : $(K)^2(L)^1$
 (d) Fluor : $(K)^2(L)^7$
- 2 (a) Le gaz noble le plus proche du chlore dans la classification périodique est l'argon ($Z = 18$). La configuration électronique de l'ion donné par le chlore est donc : $(K)^2(L)^8(M)^8$.
 (b) Le gaz noble le plus proche du magnésium est le néon ($Z = 10$). La configuration électronique de l'ion donné par le magnésium est donc : $(K)^2(L)^8$.
 (c) Le gaz noble le plus proche du lithium est l'hélium ($Z = 2$). La configuration électronique de l'ion donné par le lithium est donc : $(K)^2$.
 (d) Le gaz noble le plus proche du fluor est le néon ($Z = 10$). La configuration électronique de l'ion donné par le fluor est donc : $(K)^2(L)^8$.
- 3 (a) On voit que pour acquérir la configuration électronique de l'argon, le chlore a dû gagner un électron, donc l'ion donné par le chlore est l'ion Cl^- (ion chlorure).
 (b) Le magnésium doit, lui, perdre deux électrons. On a donc deux charges élémentaires excédentaires dans le noyau : l'ion donné par le magnésium est Mg^{2+} (ion magnésium).
 (c) Le lithium doit perdre un électron donc l'ion qu'il donne est Li^+ (ion lithium).
 (d) Le fluor doit gagner un électron, donc l'ion qu'il donne est F^- (ion fluorure).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

8 Structure atomique

Enoncé
p. 267

Lycée Janson de Sailly, Paris

- 1 Cet atome comporte au total $2 + 8 + 3 = 13$ électrons, donc 13 protons pour assurer sa neutralité électrique. Son numéro atomique est donc $Z = 13$.
- 2 La couche externe est la troisième (la couche M), donc cet atome est sur la troisième ligne (ou période). Cette couche comporte trois électrons – puisque $(M)^3 -$, donc l'atome se trouve en troisième position sur cette période.
- 3 Le nombre de nucléons de l'atome est $A = Z + N = 13 + 14 = 27$. La valeur approchée de la masse de l'atome, qui, on le sait, est concentrée dans le noyau (car les électrons sont extrêmement légers) est donnée par :

$$M \approx Am_n = 27 \times 1,675 \times 10^{-27} = 4,5225 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

En effet, protons et neutrons ont une masse très sensiblement égale.

9 Atome de carbone

Enoncé
p. 267

Lycée Lacroix, Maisons-Alfort

- 1 L'atome de carbone 13 ($^{13}_6\text{C}$) est un isotope de l'atome de carbone 12 ($^{12}_6\text{C}$).
- 2 Le nombre de protons est $Z = 6$. Le nombre de nucléons est $A = 13$. Enfin, le nombre N de neutrons est égal au nombre de nucléons qui ne sont pas des protons (car tout nucléon qui n'est pas un proton est un neutron), donc : $N = A - Z = 13 - 6 = 7$.
- 3 Il contient $Z = 6$ électrons pour assurer la neutralité électrique.
- 4 La relation approchée entre la masse M d'un atome et son nombre de nucléons A est : $M = Am_n$. Dans le cas du carbone, l'application numérique donne :

$$M = 13 \times 1,675 \times 10^{-27} = 2,178 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- 5 (a) Pour répondre aux trois questions suivantes, il suffit de multiplier le nombre d'entités en question (calculé au 1. et 2.) par la masse de l'entité (donnée dans l'énoncé). Cela donne :

$$M_p = 6 \times 1,672 \times 10^{-27} = 1,003 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- (b) De la même manière, on a :

$$M_n = 7 \times 1,675 \times 10^{-27} = 1,173 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- (c) Enfin, on a :

$$M_e = 6 \times 9,109 \times 10^{-31} = 5,465 \times 10^{-30} \text{ kg.}$$

- (d) La masse de l'atome est égale à la somme des masses de ses constituants :

$$M = M_p + M_n + M_e = 2,177 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

On remarque que l'on retrouve avec une très grande précision le résultat du 3.

- 6** L'atome de carbone comporte 6 électrons. Sa couche K est donc complète et il a $6 - 2 = 4$ électrons sur sa couche L (ce qui est parfaitement possible puisqu'elle peut en contenir jusqu'à huit). La configuration électronique de l'atome de carbone est donc $(K)^2(L)^4$.

10 Identification d'un élément

➔ Enoncé
p. 268

Lycée Thiers, Marseille

- 1** Puisque l'élément se trouve dans la deuxième ligne, sa première couche est complète, et la deuxième, puisqu'il se trouve en 6^e position, comporte six électrons.

Sa configuration électronique est donc :

$$(K)^2(L)^6.$$

- 2** Cet élément contient 8 électrons, donc $Z = 8$. C'est l'oxygène. On peut aussi le localiser directement sur le tableau périodique si on y a droit.

11 Configuration électronique

➔ Enoncé
p. 268

Lycée Masséna, Nice

- 1** La couche M est la troisième couche, et donc cela signifie que les deux premières couches sont complètes, à savoir K et L , et contiennent donc respectivement 2 et 8 électrons. Le nombre total d'électrons dans cet atome, qui est aussi le nombre de protons du noyau pour respecter la neutralité électrique globale, est :

$$Z = 2 + 8 + 5 = 15.$$

- 2** Compte-tenu de ce qui vient d'être dit, la configuration électronique complète est donc :

$$(K)^2(L)^8(M)^5.$$

12 Identification d'un anion

Enoncé
p. 268

Lycée Pasteur, Neuilly

- 1 Un anion est un ion chargé négativement (atome qui a capté un ou plusieurs électrons). Puisque celui-ci ne contient qu'une charge élémentaire, on déduit la configuration électronique de l'atome dont il dérive en retranchant un électron à la configuration électronique de l'anion, bien sûr dans la dernière couche, la couche de valence :

$$(K)^2(L)^8(M)^7.$$

- 2 Cet atome se trouve donc dans la troisième ligne de la classification périodique (remplissage jusqu'à la troisième couche) et à la septième colonne (7 électrons sur la couche de valence).

13 Atome d'oxygène

Enoncé
p. 269

Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne

- 1 Le noyau de cet atome comporte $A = 16$ nucléons dont $Z = 8$ protons. Il contient donc $N = A - Z = 8$ neutrons.
- 2 Pour assurer sa neutralité électrique, l'atome d'oxygène doit contenir 8 électrons.
- 3 Il y a donc 2 électrons sur la première couche, K (qui peut en contenir 2 au maximum) puis les 6 électrons restant se retrouvent dans la couche L , qui peut en contenir 8 au maximum.
- La configuration électronique de l'atome d'oxygène est donc :

$$(K)^2(L)^6.$$

- 4 L'ion O^{2-} correspond à un atome d'oxygène qui a capté deux électrons supplémentaires, sa configuration électronique est donc :

$$(K)^2(L)^8.$$

14 Atome de sodium

Enoncé
p. 269

Lycée Blaise Pascal, Orsay

- 1 On a $Z = 11$ et $A = 23$ donc le noyau contient 11 protons. Il contient par conséquent $N = A - Z = 23 - 11 = 12$ neutrons.
- 2 L'atome de sodium contient donc 11 électrons. Les 2 premiers sont sur la couche K , les 8 suivants se répartissent sur la couche L et l'électron restant se trouve sur la couche M .

La configuration électronique du sodium est donc :

$$(K)^2(L)^8(M)^1.$$

L'ion Na^+ correspond à un atome de sodium ayant perdu un électron. Sa configuration électronique est donc :

$$(K)^2(L)^8.$$

15 Configurations électroniques

Enoncé
p. 269

Lycée Anna Rodier, Moulins

- 1 (a) la configuration électronique de l'atome de magnésium, qui possède 12 électrons, est : $(K)^2(L)^8(M)^2$.
 (b) L'ion sulfure possède $16 + 2 = 18$ électrons. Sa configuration électronique est donc : $(K)^2(L)^8(M)^8$.
- 2 (a) L'atome de fluor possède 9 électrons pour assurer sa neutralité électrique. Sa configuration électronique est donc $(K)^2(L)^7$.
 (b) L'ion chlorure possède $17 + 1 = 18$ électrons pour remplir sa couche externe (règle de l'octet pour les ions monoatomiques). Sa configuration électronique est donc $(K)^2(L)^8(M)^8$.

16 Configuration électronique

Enoncé
p. 269

Lycée Paul Langevin, Suresnes

- 1 On complète le tableau en remplissant les couches électroniques à concurrence du numéro atomique. L'élément de la deuxième ligne est le carbone.

Élément	Symbole	Numéro atomique	Configuration électronique
Hydrogène	H	1	$(K)^1$
Carbone	C	6	$(K)^2(L)^4$
Oxygène	O	8	$(K)^2(L)^6$
Soufre	S	16	$(K)^2(L)^8(M)^6$

- 2 On voit dans la configuration électronique du carbone qu'il comporte $2 + 4 = 6$ électrons, donc son numéro atomique est égal à 6.
- 3 La couche de valence de l'élément oxygène est la couche (L), c.-à-d. la deuxième couche. L'élément oxygène appartient donc à la deuxième période du tableau périodique. En outre, il possède six électrons sur sa couche de valence, donc il se trouve à la sixième place de la deuxième période.
- 4 Les éléments carbone et oxygène ont tous deux la couche (L) pour couche de valence : ils appartiennent à la même période. Les éléments soufre et oxygène possèdent le même nombre d'électrons sur leur couche de valence, donc ils appartiennent à la même colonne.



Identification d'un atome

Enoncé
p. 270

Lycée Stanislas, Paris

- 1 La couche externe est la deuxième (la couche L), donc cet atome est sur la deuxième ligne (ou période). Cette couche comporte sept électrons – puisque $(L)^7$ –, donc l'atome se trouve à la 7^e position de cette période.
- 2 Le nombre de nucléons de l'atome est $A = Z + N = 2 + 7 + 8 = 17$.

La valeur approchée de la masse de l'atome, qui est concentrée dans le noyau (puisque les électrons sont de masse négligeable) est donnée par :

$$M \approx Am_n = 17 \times 1,675 \times 10^{-27} = 2,8475 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

Les molécules

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Les liaisons dans les molécules
3. Formules et modèles des molécules

Thèmes : la santé, la pratique du sport, l'Univers

1 Introduction

Exercice type

Lycée Henri IV, Paris

Écrire les formules semi-développées de trois molécules ayant pour formule brute $C_2H_2O_2$.

Indication :

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'oxygène divalent et l'hydrogène monovalent.

Voir corrigé page 284

Ce chapitre aborde la notion de molécule et de liaison chimique, que les atomes utilisent pour se regrouper en molécules. Nous allons également voir les notions de formule brute, formule semi-développée et formule développée d'une molécule.

2 Les liaisons dans les molécules

Les atomes ont tendance à s'assembler pour former des édifices plus complexes, appelés molécules. Une molécule peut compter seulement deux atomes (par exemple les molécules de diazote ou de dioxygène qui se trouvent dans l'air) jusqu'à plusieurs millions voire milliards (pour une molécule d'ADN, par exemple). Pour s'assembler en molécules, les atomes forment entre eux des liaisons, qui correspondent à la mise en commun d'électrons de leur couche externe. Ces électrons de la couche externe sont également appelés électrons de valence.

Nous verrons dans les classes scientifiques ultérieures les règles qui régissent l'établissement de ces liaisons (dites covalentes) entre atomes. Pour l'heure, il nous suffira de savoir qu'en général le nombre de liaisons que contracte un atome d'un élément donné est toujours le même.

2.1 La liaison simple

Définition 1

La liaison simple correspond à la mise en commun de *deux* électrons.

Exemples:

- Deux atomes d'hydrogène, qui ont chacun un électron, les mettent en commun pour former une liaison simple. On représente la molécule résultante (molécule de dihydrogène) par un trait entre les deux symboles des atomes :



- Les gaz nobles (encore appelés gaz rares) ne peuvent pas contracter de liaison avec d'autres atomes, et ne forment pas de molécules, ce qui explique leur nom (aussi bien l'épithète « noble », car ils ne se mélangent pas avec les autres éléments, que l'épithète « rare », car ils sont difficiles à isoler et identifier).
- Un atome de carbone contracte toujours quatre liaisons avec les atomes voisins.

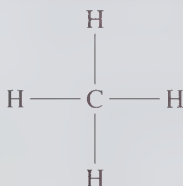


Figure 12.1 – Molécule de méthane. On voit que quatre liaisons (simples) partent de l'atome de carbone et chaque atome d'hydrogène possède une liaison simple.

La valence d'un atome est égale au nombre de liaisons qu'il peut contracter. Des exemples ci-dessus, on voit que l'hydrogène a une valence égale à un (il est dit monovalent), tandis que le carbone a une valence égale à quatre (il est dit tétravalent). Le fluor, le chlore et les autres éléments de la colonne des halogénures sont monovalents, l'oxygène est divalent (il contracte toujours deux liaisons) et l'azote est trivalent (il contracte toujours trois liaisons).

Remarque : certains éléments ont une valence qui peut prendre plusieurs valeurs selon la molécule dans laquelle ils se trouvent. Ainsi le phosphore peut-il être pentavalent (contracter cinq liaisons) ou trivalent (contracter trois liaisons).

2.1.1 - La liaison double

Définition 2

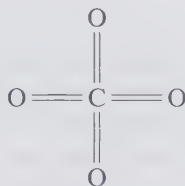
La liaison double correspond à la mise en commun de quatre électrons des couches externes : deux appartenant à l'un des atomes, et les deux autres appartenant à l'autre atome.

Exemple : on considère la molécule de dioxygène, qui est un prototype de molécule comportant une liaison double :

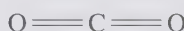


La liaison double, par rapport à une liaison simple, est plus courte, plus solide, et interdit la rotation sur elle-même. Elle est représentée par deux traits. De la même manière, on peut envisager la *liaison triple*, réalisée en mettant en commun de part et d'autre trois électrons célibataires, et qui mobilise donc au total six électrons. La liaison triple est encore plus courte et plus solide que la double liaison, et elle est représentée par un trait triple.

Une liaison double, comme son nom l'indique, compte pour deux liaisons. Ceci est important pour déterminer le nombre total de liaisons que peut contracter un atome. Examinons l'exemple ci-dessous. Nous rappelons que l'atome de carbone a une valence égale à quatre.



Impossible



Correct

L'exemple de gauche correspond à une molécule impossible : chaque liaison double compte pour deux liaisons, et l'atome de carbone posséderait donc huit liaisons ! En revanche, l'exemple de droite est correct : l'atome possède $2 \times 2 = 4$ liaisons, comme il se doit (et chaque atome d'oxygène en possède deux). Il s'agit de la molécule de dioxyde de carbone CO_2 .

De la même manière, une liaison triple compte pour trois liaisons. La molécule représentée ci-dessous est donc correcte (chaque atome d'hydrogène a une liaison et chaque atome de carbone en a quatre) :



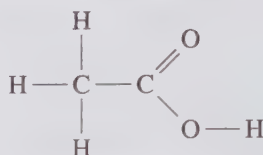
Figure 12.2 – Molécule d'acétylène

3 Formules et modèles des molécules

3.1 Formule développée

Lorsqu'on écrit la formule d'une molécule, on remplace chaque paire d'électrons par un trait, ce qui fait, ainsi que nous l'avons vu ci-dessus, que chaque liaison simple (une paire d'électrons) est représentée par un trait, et chaque liaison double (deux paires d'électrons) est représentée par deux traits parallèles. La représentation d'une molécule utilisant cette règle fournit beaucoup d'information

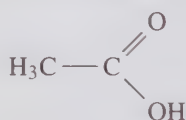
sur la structure de la molécule, mais elle est relativement lourde et occupe beaucoup d'espace. On l'appelle la formule développée. La figure ci-dessous donne par exemple la formule développée d'une molécule appelée acide éthanóique (ou acétique) :



On peut vérifier que la valence de chaque atome (4 pour le carbone, 2 pour l'oxygène et 1 pour l'hydrogène) est bien satisfaite sur cette formule développée.

3.2 Formule semi-développée

La formule semi-développée reprend le principe de la formule développée, mais condense l'écriture des parties évidentes de la molécules, celles pour lesquelles il n'y a pas d'ambiguïté possible : on n'écrit pas les liaisons simples impliquant les atomes d'hydrogène. Cela permet de simplifier considérablement l'écriture sans pour autant conduire à une perte d'information. La figure suivante montre la formule semi-développée de l'acide éthanóique (ou acétique) :



3.3 Formule brute

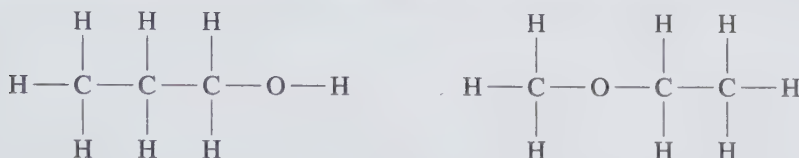
La formule brute, enfin, condense l'information de manière beaucoup plus considérable, et ne retient que le nombre de chaque type d'atomes présents dans la molécule. Ainsi, la formule brute de l'acide éthanóique est $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, puisque la molécule possède deux atomes de carbones, deux atomes d'oxygène et deux atomes d'hydrogène. Toutefois, la simplification considérable d'écriture conduit à une perte d'information, comme nous allons le voir ci-après.

3.4 Formule usuelle

Un compromis fréquent consiste à utiliser une formule « usuelle », ni totalement brute ni réellement semi-développée qui nous permet de perdre moins d'information que la formule brute tout en gardant une structure compacte : CH_3COOH .

3.5 Isoméris

Deux molécules sont dites isomères ou en relation d'isomérisie si elles n'ont pas la même formule développée (ou semi-développée) mais ont la même formule brute. Ainsi, les deux molécules ci-dessous ont la même formule brute C_3H_8O , mais n'ont pas la même formule semi-développée. Ce sont des isomères.



Ainsi, on voit que l'on perd de l'information lorsque l'on passe de la formule (semi-)développée à la formule brute, puisqu'on ne peut pas remonter à la formule (semi-)développée de manière univoque.

3.6 Modèles moléculaires

Les modèles moléculaires permettent de donner une représentation tridimensionnelle de la molécule. Les atomes y sont représentés par des sphères dont le rayon dépend de l'élément chimique, et dont la couleur est donnée par convention. Dans le modèle moléculaire compact, les sphères s'interpénètrent et les liaisons n'apparaissent pas explicitement. Ces modèles sont assez peu lisibles.

En revanche, dans le modèle moléculaire éclaté, les sphères représentant les atomes ont un rayon beaucoup plus petit, et les liaisons y sont représentées par des bâtons (doubles, simples ou triples selon la nature de la liaison).

Par *convention*, dans les modèles moléculaires les atomes d'hydrogène sont en blanc (parfois en gris clair), les atomes de carbone en noir (parfois en gris foncé), les atomes d'oxygène en rouge et les atomes d'azote en bleu.

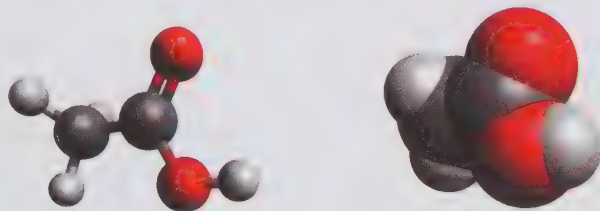


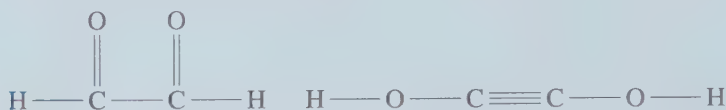
Figure 12.3 – Modèle moléculaire éclaté (à gauche) et compact (à droite) de l'acide éthanoïque.

 Solution de l'exercice type

Lycée Henri IV, Paris

Il s'agit de trouver trois manières d'assembler les six atomes (deux de carbone, deux d'oxygène et deux d'hydrogène) de telle manière que quatre liaisons partent de chaque atome de carbone, deux liaisons de chaque atome d'oxygène et une liaison de chaque atome d'hydrogène.

Nous proposons les formules suivantes :



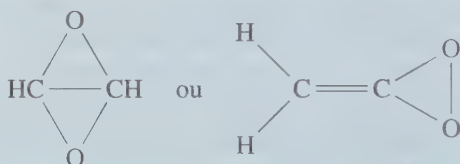
Molécule 1

Molécule 2



Molécule 3

Il en existe de nombreuses autres, certaines plus complexes. Par exemple :



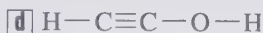
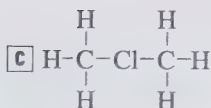
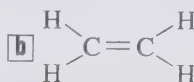
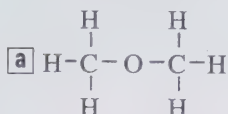
Voir énoncé page 279

1 QCM Testez vos connaissances

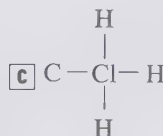
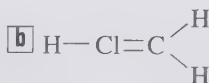
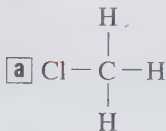
5 min

 Corrigé
p. 290

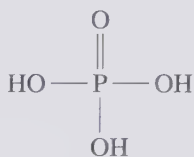
- 1 Parmi les molécules suivantes, identifier celle(s) qui ne peut (peuvent) pas exister (on rappelle que l'hydrogène et le chlore sont monovalents, l'oxygène divalent et le carbone tétravalent) :



- 2 Un corps composé a pour formule brute CH_3Cl . Sa formule développée peut être :



- 3 On donne ci-dessous la structure d'une molécule contenant un atome de phosphore :



Pour cette molécule, la valence de l'atome de phosphore est :

a trois

b quatre

c cinq

2 Chercher les intrus

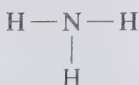


5 min

 Corrigé
p. 290

Lycée Hélène Boucher, Toulouse

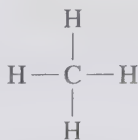
Identifier parmi les formules développées ci-dessous celles qui sont incorrectes. On rappelle que l'hydrogène et le chlore sont monovalents, l'oxygène est divalent et le carbone tétravalent.



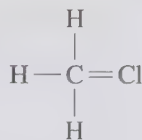
molécule 1



molécule 2



molécule 3



molécule 4

3 Sulfure d'hydrogène



5 min

Corrigé
p. 290

Lycée du Parc, Lyon

Le composé le plus simple que peut donner le soufre avec l'hydrogène est le sulfure d'hydrogène. Déterminer sa formule développée, sachant que la valence du soufre est de deux, et que l'hydrogène est monovalent.

4 Formules de molécules

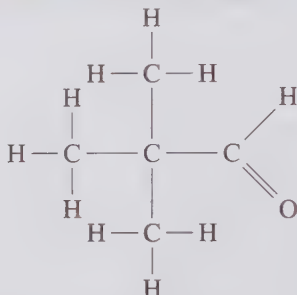


5 min

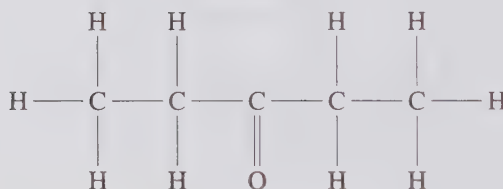
Corrigé
p. 290

Lycée Saint-John Perse, Pau

On donne les formules brutes de deux molécules :



molécule A



molécule B

- 1 Quelle est la formule brute de la molécule A ? De la molécule B ?
- 2 Quelle relation existe entre ces deux molécules ?
- 3 Donner leurs formules semi-développées.

5 Formules développées



15 min

Corrigé
p. 291

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

Établir les formules développées des molécules suivantes :



Indication :

On rappelle que l'hydrogène et le chlore sont monovalents, l'azote et le phosphore trivalents et le carbone tétravalent.

6

Formule développée

★★

10 min

→ Corrigé
p. 292**Lycée Charlemagne, Paris**

Une molécule a pour formule brute CH_4O . Quelle est sa formule développée ?

Données :

L'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'hydrogène est monovalent et l'atome d'oxygène divalent.

7

Trichlorure de phosphore

★★

10 min

→ Corrigé
p. 292**Lycée Turgot, Paris**

Donnez la formule développée de la molécule PCl_3 , sachant que le chlore est monovalent.

8

Formules développées

★★

10 min

→ Corrigé
p. 292**Lycée Jean Bosco, Guines**

Donner les formules développées des molécules suivantes :

1

 H_2O

2

 NH_3

3

 CO_2

4

 N_2

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'azote trivalent, l'atome d'oxygène divalent et l'atome d'hydrogène monovalent.

9

Formules développées

★★

5 min

→ Corrigé
p. 292**Lycée Henri IV, Paris**

Donner la formule développée des molécules CO_2 , HCl , NH_3 .

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'azote trivalent, l'atome d'oxygène divalent et les atomes d'hydrogène et de chlore monovalents.

10

Isomères

★★

15 min

→ Corrigé
p. 292**Lycée Pierre Corneille, La Celle Saint-Cloud**

1

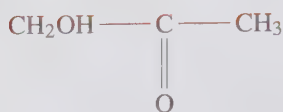
Rappeler ce que sont des isomères.

2

Donner les deux formules semi-développées possibles correspondant à la formule brute C_4H_{10} . On rappelle que le carbone est tétravalent et l'hydrogène monovalent.

3

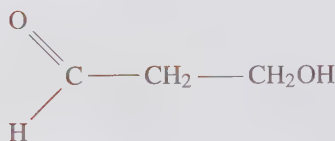
Dans la liste ci-dessous, identifier les paires d'isomères et les paires de molécules identiques. Noter la réponse sous la forme « a et b sont isomères » ou « a et b sont identiques » pour toutes les paires utiles.



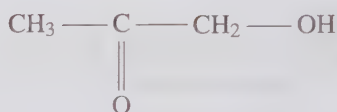
molécule a



molécule b



molécule c



molécule d

11 Isomères du pentane

★★

10 min

Corrigé
p 293

Lycée Auguste Renoir, Limoges

Écrire les formules semi-développées des trois molécules de formule brute C_5H_{12} .

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent et l'atome d'hydrogène monovalent.

12 Éthanol et éther

★★

20 min

Corrigé
p 293

Lycée Notre-Dame du Grandchamp, Versailles

L'éthanol et l'éther sont deux molécules ayant pour formule brute $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$.

- 1 Donner la définition d'un isomère.
- 2 Écrire les formules développée et semi-développée de l'éthanol, sachant qu'il possède le groupe $\text{O} - \text{H}$.
- 3 Écrire la formule semi-développée de l'éther sachant qu'il ne possède pas de groupe $\text{O} - \text{H}$.
- 4 L'éthanol et l'éther sont-ils des isomères ?

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'oxygène divalent et l'atome d'hydrogène monovalent.

13 Formules développées

★★

15 min

Corrigé
p 294

Lycée Fustel de Coulanges, Massy

Donner, en expliquant, la formule développée de chacune des molécules suivantes : CH_2O_2 , $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$ et CH_3ON .

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'azote trivalent, l'atome d'oxygène divalent et l'atome d'hydrogène monovalent.

14 Solution d'éthanol

★★

15 min

Corrigé
p. 294**Lycée Victor Duruy, Paris**

- 1 Donner la définition des isomères.
- 2 La molécule de butanol comporte quatre atomes de carbone, dix atomes d'hydrogène et un seul atome d'oxygène. Donner sa formule brute.
- 3 Donner les formules semi-développée de deux isomères du butanol.

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'oxygène divalent et l'hydrogène monovalent.

15 Molécule de méthanal

★★

10 min

Corrigé
p. 295**Lycée Saint-Adrien, Villeneuve-d'Ascq**

La molécule de méthanal contient un atome de carbone, un atome d'oxygène et des atomes d'hydrogène. Elle comporte en outre une double liaison. Donner sa formule développée.

Indications :

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'oxygène divalent et l'hydrogène monovalent.

16 Formules développées

★★★

20 min

Corrigé
p. 295**Lycée Pasteur, Neuilly**

- 1 L'élément silicium Si est tétravalent et l'élément fluor F est monovalent. Déterminer la formule du tétrafluorure de silicium.
- 2 Un corps pur a pour formule C_3H_8O . Déterminer trois formules possibles pour ce corps pur ne comportant que des liaisons simples.

On rappelle que l'atome de carbone est tétravalent, l'atome d'azote trivalent, l'atome d'oxygène divalent et l'atome d'hydrogène monovalent.

17 Molécule d'éthanal

★★★

10 min

Corrigé
p. 296**Lycée La Colline, Montpellier**

Donner la formule développée de l'éthanal, sachant que cette molécule comporte deux atomes de carbone, des atomes d'hydrogène, un atome d'oxygène possédant une liaison double, que son atomicité (nombre d'atomes) est 7, et qu'elle n'a pas de liaison double carbone-carbone ($C = C$).

Indications :

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'oxygène divalent et l'hydrogène monovalent.

1 QCM Testez vos connaissances

➔ **Énoncé**
p. 285

- 1 **c**. Le chlore est monovalent.
- 2 **a**. Là encore, parce que le chlore est monovalent.
- 3 **c**. Ici l'atome de phosphore a contracté une double liaison et trois liaisons simples donc sa valence est $1 \times 2 + 3 \times 1 = 5$.

2 Chercher les intrus

➔ **Énoncé**
p. 285

Lycée Hélène Boucher, Toulouse

- 1 La formule développée de l'ammoniac est correcte.
- 2 La formule développée du dioxyde de carbone est incorrecte : la valence du carbone est 4 et non 6, et celle de l'oxygène est 2 et non 3, donc il devrait s'agir de doubles liaisons et non de triples liaisons.
- 3 Cette formule développée de la molécule de méthane est correcte.
- 4 Cette formule développée du monochlorométhane est incorrecte : le chlore est monovalent et non divalent, et le carbone est tétravalent et non pentavalent.

3 Sulfure d'hydrogène

➔ **Énoncé**
p. 286

Lycée du Parc, Lyon

La formule développée du sulfure d'hydrogène est la suivante :

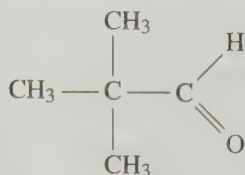


4 Formules de molécules

➔ **Énoncé**
p. 286

Lycée Saint-John Perse, Pau

- 1 Les deux molécules ont pour formule brute $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}$.
- 2 Puisqu'elles ont même formule brute mais des formules développées différentes, ces molécules sont des isomères.
- 3 Leurs formules semi-développées sont :



5 Formules développées

➔ **Enoncé**
p. 286

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

Nous construisons les formules développées des molécules dont la formule brute est donnée dans l'énoncé, en respectant la « règle du jeu » à respecter que chaque atome de la molécule obtenue doit avoir un nombre de liaisons égal à sa valence. On obtient les molécules suivantes :



Figure 12.4 – Formule développée de HCN (acide cyanhydrique).

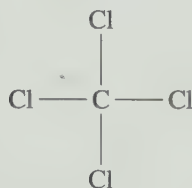


Figure 12.5 – Formule développée de CCl_4 (tétrachlorométhane).

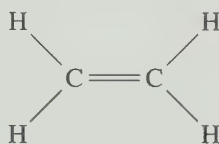


Figure 12.6 – Formule développée de C_2H_4 (éthylène).



Figure 12.7 – Formule développée de N_2 (diazote).

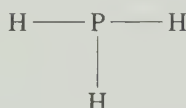
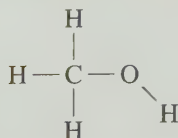


Figure 12.8 – Formule développée de PH_3 .

6 Formule développée

➔ **Enoncé**
p. 287

Lycée Charlemagne, Paris



On vérifiera aisément que la molécule ci-contre est la seule qui puisse convenir à la formule brute. En particulier, il est nécessaire que l'oxygène ne contracte qu'une liaison simple avec le carbone, sans quoi on ne peut pas disposer assez d'atomes d'hydrogène pour compléter la molécule.

7 Trichlorure de phosphore

➔ **Énoncé**
p. 287

Lycée Turgot, Paris

La seule manière d'agencer les trois atomes de chlore et l'atome de phosphore en respectant la valence de chacun est de la manière suivante :



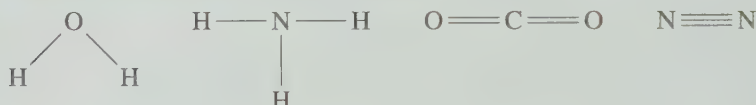
Figure 12.9 – Formule développée du trichlorure de phosphore.

8 Formules développées

➔ **Énoncé**
p. 287

Lycée Jean Bosco, Guines

On respecte la valence de chaque élément, et on obtient :



molécule 1

molécule 2

molécule 3

molécule 4

Figure 12.10 – Formules développées des molécules de l'énoncé.

9 Formules développées

➔ **Énoncé**
p. 287

Lycée Henri IV, Paris

Les formules développées des molécules de l'énoncé sont les suivantes :

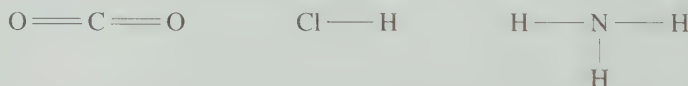


Figure 12.11 – Formules développées des molécules de dioxyde de carbone, de chlorure d'hydrogène et d'ammoniac.

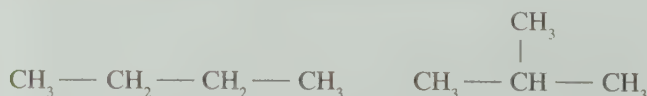
10 Isomères

➔ **Énoncé**
p. 287

Lycée Pierre Corneille, La Celle Saint-Cloud

1 Des isomères sont des molécules ayant même formule brute mais des formules développées différentes.

2 Les deux formules semi-développées possibles sont :



3 Commençons par noter que les molécules *a* et *d* sont identiques. Les molécules *a*, *c* et *d* ont pour formule brute $C_3H_6O_2$, tandis que la molécule *b* a pour formule brute C_3H_6O . Nous avons donc les relations suivantes :

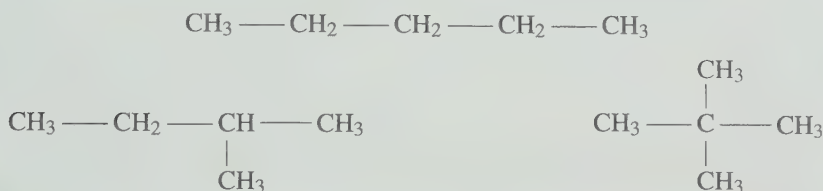
- *a* et *c* sont isomères.
- *c* et *d* sont isomères.
- *a* et *d* sont identiques.

11 Isomères du pentane

Enoncé
p. 288

Lycée Auguste Renoir, Limoges

Les trois formules semi-développées recherchées sont représentées sur la figure suivante :



12 Éthanol et éther

Enoncé
p. 288

Lycée Notre-Dame du Grandchamp, Versailles

- 1 Un isomère est une molécule possédant la même formule brute qu'une autre molécule, mais qui a une formule développée ou semi-développée différente.
- 2 On commence par écrire le groupement $O-H$. L'autre liaison contractée par l'atome d'oxygène doit forcément se faire avec un atome de carbone (sans quoi on obtient une molécule d'eau, de formule brute différente à celle recherchée). Cet atome de carbone doit lui-même être engagé dans une autre liaison avec l'autre atome de carbone. On complète avec les atomes d'hydrogène à concurrence de la valence de chaque atome, et on vérifie que l'on obtient bien une molécule de formule brute C_2H_6O .



- 3 L'éther ne possédant pas de liaison $O-H$, on en déduit que les deux liaisons de l'atome d'oxygène se font avec un atome de carbone. On complète la molécule avec des atomes d'hydrogène à concurrence de la valence de chaque atome de carbone, et on vérifie que l'on obtient bien une molécule de formule brute C_2H_6O :



- 4 L'éthanol et l'éther ayant même formule brute mais pas la même formule développée, ce sont par définition des isomères.

13 Formules développées

Enoncé
p. 288

Lycée Fustel de Coulanges, Massy

Il s'agit de trouver les formules développées des trois molécules citées qui respectent les valences de chacun des atomes (4 pour le carbone, 3 pour l'azote, 1 pour l'hydrogène, 2 pour l'oxygène) de manière à ce que la valence de chaque atome soit satisfaite. On trouve alors les formules développées suivantes :

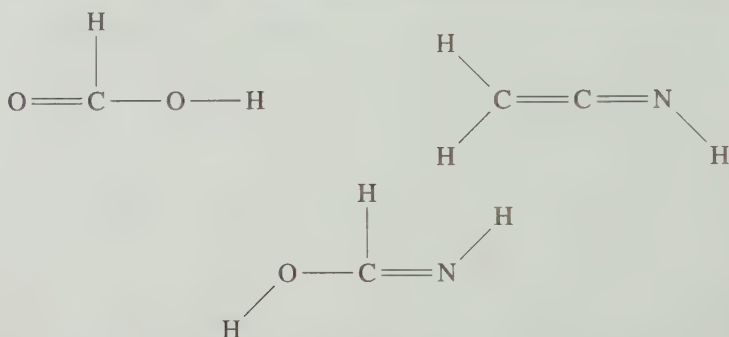


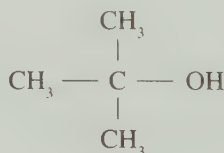
Figure 12.12 – Formules développées des molécules de l'énoncé.

14 Solution d'éthanol

Enoncé
p. 289

Lycée Victor Duruy, Paris

- Des isomères sont des molécules ayant même formule brute mais des formules développées différentes.
- La formule brute du butanol est $C_4H_{10}O$.
- On représente sur la figure ci-dessous deux isomères du butanol, c.-à-d. deux molécules ayant pour formule brute $C_4H_{10}O$. On veille à respecter la valence de chaque élément : les atomes de carbone doivent posséder quatre liaisons chacun, les atomes d'hydrogène une liaison chacun, et l'atome d'oxygène deux liaisons.



15 Molécule de méthanal

➔ **Énoncé**
p. 289

Lycée Saint-Adrien, Villeneuve-d'Ascq

Il faut dans cet exercice construire la molécule en respectant la valence de chaque élément et en tenant compte des précisions de l'énoncé. Il n'y a qu'une manière de le faire.

Cela donne :

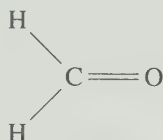


Figure 12.13 – Formule développée du méthanal.

16 Formules développées

➔ **Énoncé**
p. 289

Lycée Pasteur, Neuilly

- 1 La formule du tétrafluorure de silicium est donc nécessairement la suivante (une seule liaison par atome de fluor et quatre pour le silicium) :

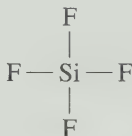


Figure 12.14 – Formule développée du tétrafluorure de silicium.

- 2 Les trois formules développées possibles pour le corps pur de formule $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ sont :

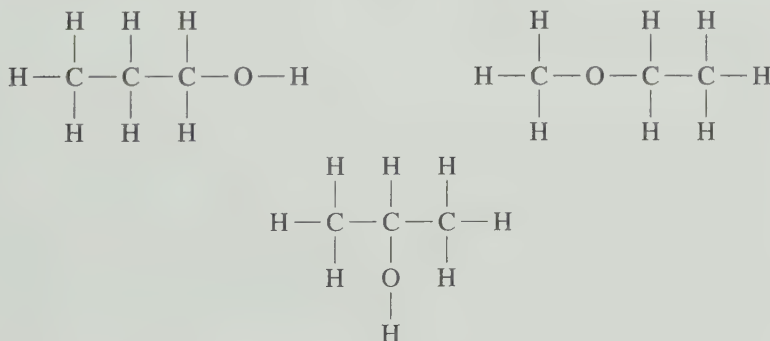


Figure 12.15 – Formules développées correspondant au corps de formule brute donnée dans l'énoncé.

On pourra vérifier que ce sont les trois seules formules développées possibles.

17 Molécule d'éthanal

Enoncé
p. 289

Lycée La Colline, Montpellier

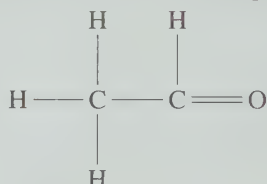
Nous commençons par chercher le « squelette » de cette molécule, c'est-à-dire sa formule développée sans les atomes d'hydrogène, que nous placerons dans un second temps pour respecter la valence de chaque atome.

La valence de l'oxygène est égale à deux, et l'atome d'oxygène de la molécule comportant une double liaison, il se trouve forcément à une extrémité du squelette, que nous pouvons écrire :



où la liaison $\text{C} - \text{C}$ ne peut être triple (donc forcément simple) sans quoi le carbone du milieu serait au moins pentavalent, ce qui est impossible.

Nous complétons à présent ce squelette avec des atomes d'hydrogène, monovalents, de manière à respecter la valence de chaque atome :



Cette molécule vérifie toutes les conditions de l'énoncé. En particulier son atomicité est bien égale à 7. C'est la molécule d'éthanal.

Groupes caractéristiques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Notions de chimie organique
3. Groupes caractéristiques

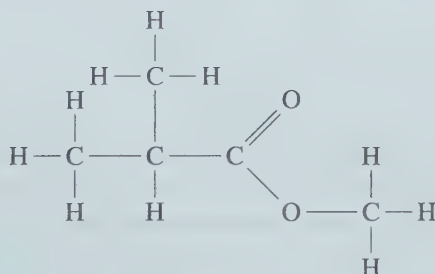
Thèmes : la santé, la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Saint-Genève, Versailles

On considère le 2-méthylpropanoate de méthyle, dont la formule développée est la suivante :



- 1 Écrire sa formule semi-développée.
- 2 Identifier le groupe caractéristique dans cette molécule et en déduire à quelle famille il appartient.
- 3 Donner la formule semi-développée d'un acide carboxylique qui soit isomère du 2-méthylpropanoate de méthyle.

Voir corrigé page 301

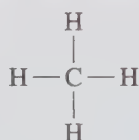
Ce chapitre aborde la notion de groupe caractéristique, que l'on nomme aussi « groupe fonctionnel ». Ces groupes déterminent en grande partie les propriétés des molécules organiques.

2 Notions de chimie organique

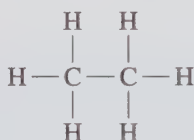
La chimie organique est la branche de la chimie qui étudie les molécules organiques. Celles-ci consistent en un « squelette » carboné, c'est-à-dire un ensemble d'atomes de carbone et d'hydrogène, sur lequel se trouvent éventuellement d'autres atomes (notamment azote, oxygène, ou des atomes de la famille des halogènes), formant ce que l'on appelle des groupes caractéristiques, qui assurent certaines propriétés à la molécule. Nous présentons dans un premier temps les molécules comportant exclusivement des atomes de carbone et d'hydrogène, puisque celles-ci servent de base à la chimie organique.

2.1 Alcanes

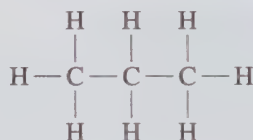
Les alcanes sont l'ensemble des molécules comportant exclusivement des atomes de carbone et d'hydrogène, et dans lesquelles les atomes de carbone sont exclusivement liés entre eux par des liaisons simples. Nous présentons ci-dessous quelques alcanes simples :



méthane



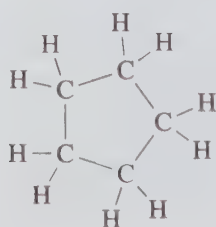
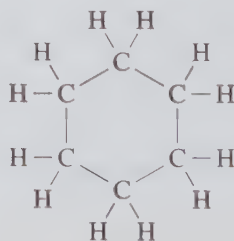
éthane



propane

Lorsqu'une molécule d'alcane ne comporte pas de cycle, sa formule brute est $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, où n est le nombre d'atomes de carbone. Ainsi les formules brutes du méthane ($n = 1$), de l'éthane ($n = 2$) et du propane ($n = 3$) sont respectivement CH_4 , C_2H_6 et C_3H_8 . Lorsque la molécule comporte un cycle, la formule brute est du type C_nH_{2n} . On parle alors de cycloalcanes (ou de cyclanes).

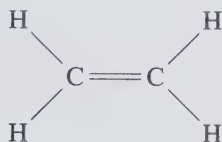
Exemples:

cyclopentane C_5H_{10} cyclohexane C_6H_{12}

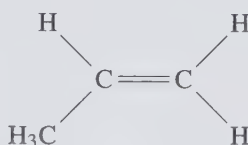
2.2 Alcènes

Les alcènes sont des molécules comportant exclusivement des atomes de carbone et d'hydrogène, dans lesquelles l'une au moins des liaisons carbone-carbone est une liaison double. Lorsqu'un alcène ne comporte qu'une seule double liaison et n'a pas de cycle, sa formule brute est C_nH_{2n} .

Exemples :

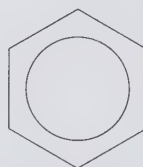
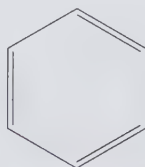
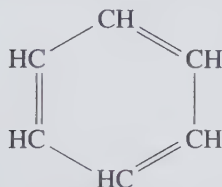


éthène (ou éthylène)



propène

La notion de cycle aromatique est de première importance en chimie organique. La molécule prototype de ces cycles est la molécule de benzène C_6H_6 , dont nous donnons les représentations ci-dessous :



Les deux représentations de droite sont appelées des formules topologiques. Celles-ci ne sont pas au programme de la classe de Seconde, mais il pourra occasionnellement arriver que les cycles aromatiques d'une molécule soient représentés en utilisant cette notation, compacte et pratique. On n'oubliera pas, lorsque l'on reconstituera la formule semi-développée de la molécule, que l'on a un atome de carbone à chaque sommet, que le carbone est tétravalent, et que le cycle comporte trois liaisons doubles alternées avec trois liaisons simples.

2.3 Alcynes

Les alcynes sont des molécules comportant exclusivement des atomes de carbone et d'hydrogène, à l'instar des alcanes et alcènes, telles qu'au moins l'une des liaisons carbone-carbone soit triple.

Exemple : $H - C \equiv C - H$ molécule d'éthyne (ou acétylène).

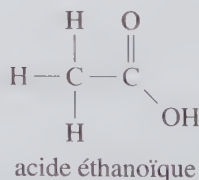
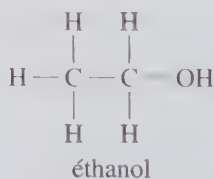
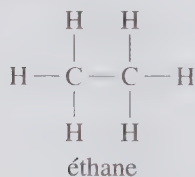
3 Groupes caractéristiques

Lorsqu'une molécule organique comporte d'autres atomes que des atomes de carbone et d'hydrogène, elle possède de nouvelles propriétés, qui dépendent de ces atomes et de la manière dont ils sont agencés et connectés au squelette carboné. Puisqu'ils déterminent en grande partie les propriétés de la molécule, on parle de *groupes caractéristiques*. Nous donnons ci-dessous le tableau des principaux groupes caractéristiques et les familles chimiques auxquelles ils correspondent.

Groupe caractéristique	Nom du groupe et/ou famille
—OH	Groupe hydroxyle (alcools)
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—H} \end{array}$	Groupe carboxyle Famille des acides carboxyliques
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—O—} \end{array}$	Esters
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—} \end{array}$	Cétones
—O—	Éther oxyde
$\begin{array}{c} \diagup \\ \text{—N} \\ \diagdown \end{array}$	Amines
$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—N} \\ \diagup \end{array}$	Amides

Bien que la nomenclature des molécules organiques ne soit pas au programme de la classe de Seconde, il est utile de savoir que le nom des molécules organiques simples, en général, se dérive du nom de l'alcane ayant le même squelette carboné, auquel on change le suffixe -ane pour un autre suffixe qui dépend de la famille à laquelle appartient la molécule.

Exemples:



Solution de l'exercice type

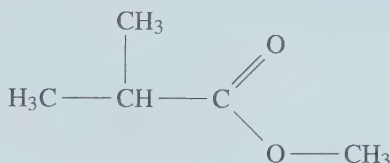
Lycée Saint-Geneviève, Versailles

COURS

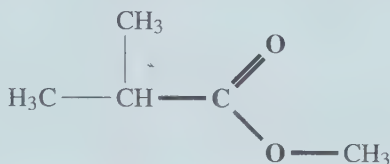
INTERROS

CORRIGÉS

- 1 La formule semi-développée du 2-méthylpropanoate de méthyle est :



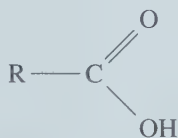
- 2 Nous faisons apparaître en gras le groupe caractéristique de cette molécule :



Il s'agit du groupe caractéristique des esters. Le 2-méthylpropanoate de méthyle est donc un ester.

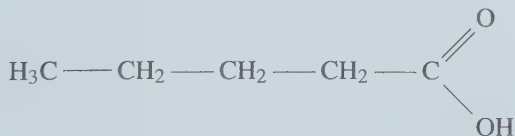
- 3 Pour répondre à cette question, commençons par déterminer la formule brute du 2-méthylpropanoate de méthyle. À partir de sa formule développée ou semi-développée, nous comptons cinq atomes de carbone, dix atomes d'hydrogène et deux atomes d'oxygène, donc la formule brute recherchée est $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$.

Écrivons à présent l'acide carboxylique recherché sous la forme :



où R est un groupement alkyle à déterminer, connecté au groupe caractéristique des acides carboxyliques. Pour cet acide ait même formule brute que le 2-méthylpropanoate de méthyle, il faut que R comporte quatre atomes de carbone et neuf atomes d'hydrogène.

Nous en déduisons une formule possible pour cet acide :

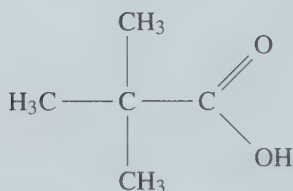
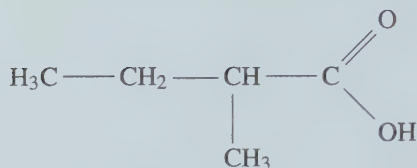
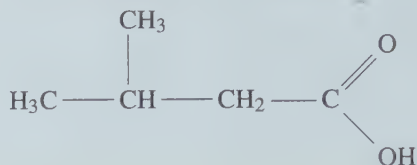


Nous vérifions que la formule brute de cette molécule est $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$.

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Saint-Geneviève, Versailles

Notons que la réponse à cette question n'est pas unique. Ainsi, les formules semi-développées page suivante représentent également des acides carboxyliques isomères du 2-méthylpropanoate de méthyle :



Notons en particulier que cette dernière formule semi-développée pouvait simplement être obtenue en intervertissant l'atome d'hydrogène du deuxième carbone et le groupe méthyle ($-\text{CH}_3$) de droite de la formule développée proposée en énoncé.

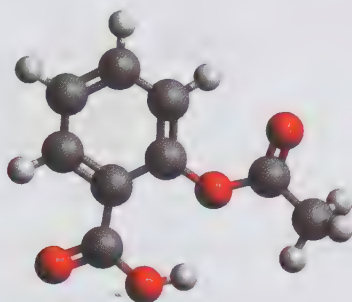
Voir énoncé page 297

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

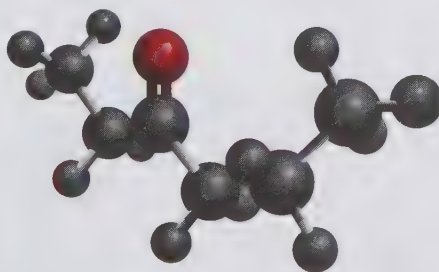
→ Corrigé
p. 310

- 1** Le modèle moléculaire éclaté suivant représente une molécule d'aspirine :



- (a) Cette molécule possède un groupe caractéristique « alcool »
☐ a Vrai ☐ b Faux
- (b) Cette molécule possède un groupe caractéristique « acide carboxylique »
☐ a Vrai ☐ b Faux
- (c) Cette molécule possède un groupe caractéristique « ester »
☐ a Vrai ☐ b Faux
- (d) Cette molécule possède un groupe caractéristique « amine »
☐ a Vrai ☐ b Faux

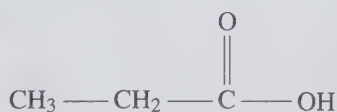
- 2** La molécule suivante :



appartient à la famille des :

- ☐ a acides carboxyliques ☐ b cétones ☐ c alcools

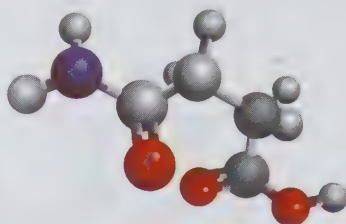
- 3** La molécule suivante :



possède le groupement $-\text{OH}$. C'est donc un alcool.

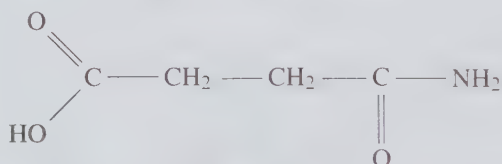
- ☐ a Vrai ☐ b Faux

- 4 On considère la molécule représentée ci-dessous :

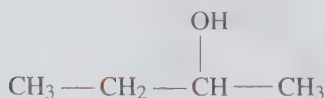


Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

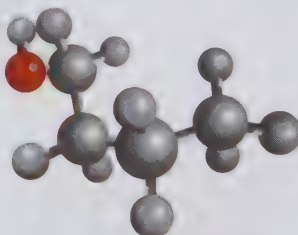
- (a) L'atome représenté en bleu est un atome d'oxygène.
- (b) Les atomes représentés en rouge sont divalents.
- (c) Cette molécule possède un groupe caractéristique « amine ».
- (d) Cette molécule possède un groupe caractéristique « amide ».
- (e) Cette molécule appartient à la famille des alcools.
- (f) Cette molécule appartient à la famille des acides carboxyliques.
- (g) La molécule a pour formule brute $C_4H_7O_2N$.
- (h) La formule semi-développée de la molécule est :



- 5 On considère les deux molécules suivantes :



molécule A



molécule B

Répondre par vrai ou faux aux affirmations suivantes :

- (a) A et B sont isomères
- (b) A et B sont des cétones
- (c) A et B sont identiques

2 Comparaison de molécules

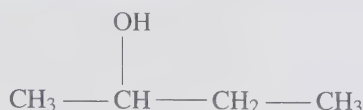


10 min

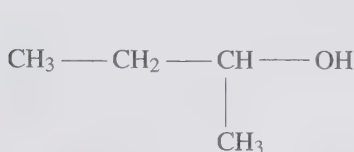
Corrigé
p. 311

Lycée Édouard Herriot, Lyon

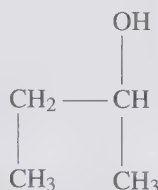
On considère la molécule M de formule semi-développée suivante :



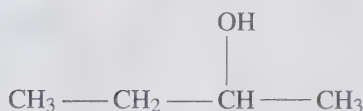
- 1 Quelle est sa formule brute ?
- 2 À quelle famille de molécules chimique appartient-elle ?
- 3 Parmi les formules semi-développées et modèles moléculaires éclatés donnés ci-dessous, identifier ceux qui correspondent à la molécule M, et ceux qui correspondent à des isomères de M.



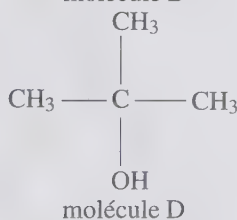
molécule A



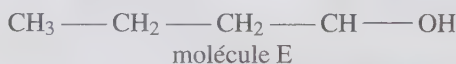
molécule B



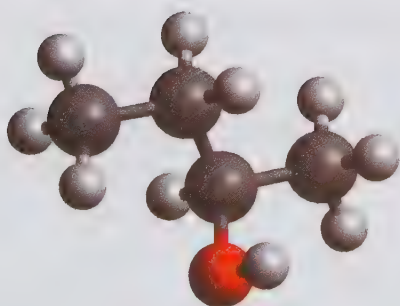
molécule C



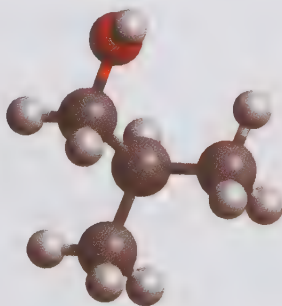
molécule D



molécule E



molécule F



molécule G

3 Molécule de menthone

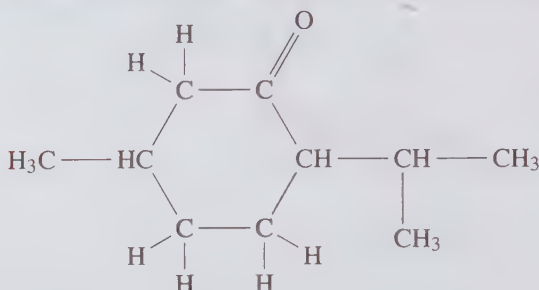


5 min

Corrigé
p. 312

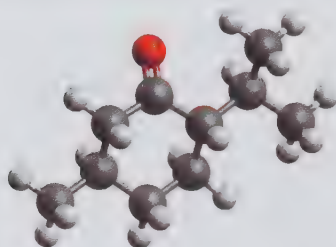
Lycée Kléber, Strasbourg

On donne la formule semi-développée de la molécule de menthone :

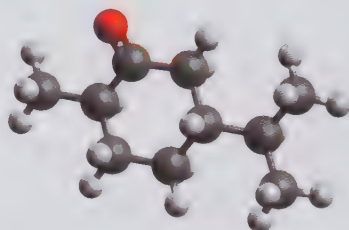


menthone

- 1 À quelle famille de molécules chimique appartient-elle ?
- 2 Lequel des deux modèles moléculaires éclatés ci-dessous représente une molécule de menthone ? Quelle est la formule semi-développée correspondant à l'autre modèle ?



modèle A



modèle B

4 groupes caractéristiques

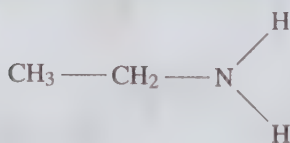


20 min

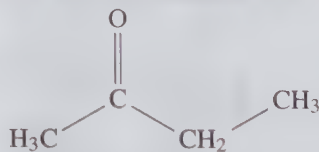
Corrigé
p. 312

Lycée Romain Rolland, Ivry-sur-Seine

On donne ci-dessous la formule développée de deux molécules, A et B.



molécule A



molécule B

1 Compléter le tableau :

	Molécule A	Molécule B
Nombre d'atomes dans la molécule		
Nombre d'éléments dans la molécule		
Nombre de liaisons simples		
Nombre de liaisons doubles		
Formule brute		

- 2 Recopier les formules et entourer leurs groupes caractéristiques.
- 3 Dans quelles familles trouve-t-on ces groupes caractéristiques ?
- 4 Parmi les deux molécules, l'une est une molécule de butanone et l'autre d'éthylamine. Attribuer à chaque molécule son nom, en justifiant.
- 5 Ces molécules sont-elles des isomères ?



Motif de polymère

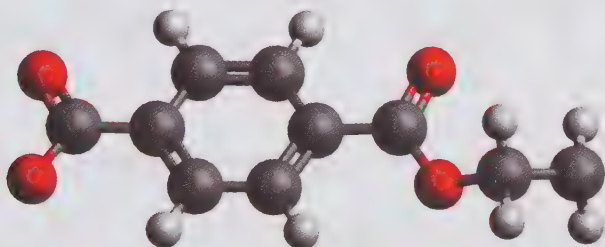


10 min

Corrigé
p. 313

Lycée Louis Pergaud, Besançon

Le modèle moléculaire éclaté ci-dessous représente le motif d'un polymère (encore appelé monomère). Il n'y a pas d'atome caché par effet de perspective.



- 1 Quels sont les atomes situés aux extrémités du motif ?
- 2 Écrire la formule semi-développée du polymère.

Indications : l'atome de carbone a une valence égale à quatre, et l'atome d'oxygène une valence égale à deux.

6 Formules semi-développées



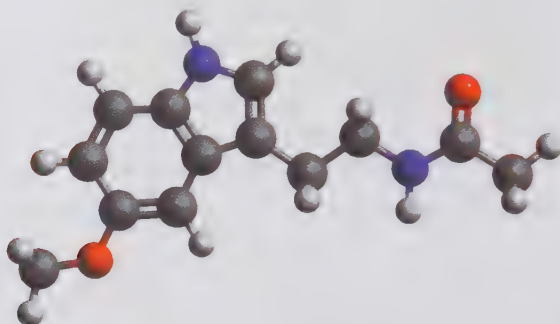
15 min

Corrigé
p. 314

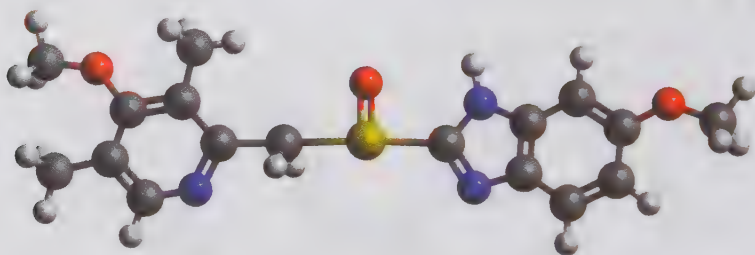
Lycée Henri Poincaré, Nancy

Écrire la formule semi-développée des molécules suivantes :

- 1 Molécule de mélatonine

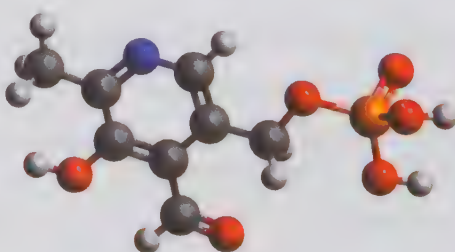


- 2 Molécule d'oméprazole



Dans cette molécule l'atome représenté en jaune est un atome de soufre. Il est ici tétravalent.

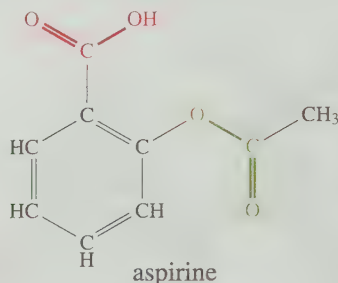
- 3 Molécule de vitamine B6



L'atome représenté en orange est un atome de phosphore. Il est ici pentavalent.

1 **Testez vos connaissances**Enoncé
p. 303

- 1 Nous écrivons ci-dessous la formule semi-développée de la molécule d'aspirine, et nous faisons apparaître ses deux groupes caractéristiques (acide carboxylique, en rouge, et ester, en vert) :



Les réponses aux questions sont donc :

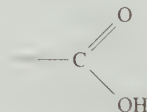
- (a) *Faux* (b) *Vrai* (c) *Vrai* (d) *Faux*

- 2 La formule semi-développée de la molécule est :



où l'on fait apparaître en gras son groupe caractéristique. C'est donc une cétone (réponse **b**).

- 3 *Faux*. Le groupement OH de cette molécule appartient à un groupe caractéristique plus important :



caractéristique des acides carboxyliques.

- 4 (a) *Faux*. Cet atome est trivalent : il comporte trois liaisons simples. C'est un atome d'azote.
 (b) *Vrai*.
 (c) *Faux*. Le carbone voisin de l'atome d'azote possède une double liaison avec un atome d'oxygène.
 (d) *Vrai*, pour la raison invoquée à la réponse précédente.
 (e) *Faux*. La molécule possède le groupe caractéristique carboxyle et non simplement le groupe caractéristique hydroxyle OH.
 (f) *Vrai*.
 (g) *Faux*. La molécule a pour formule brute $C_4H_7O_3N$.
 (h) *Vrai*.

- 5** Il convient d'écrire, avant de répondre aux questions, la formule semi-développée de la molécule B. Celle-ci est :



On voit dès lors que :

- (a) A et B sont isomères (elles ont même formule brute $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$).
- (b) A et B ne sont pas des cétones : ce sont des alcools.
- (c) A et B ne sont pas identiques : le groupe caractéristique « hydroxyle », caractéristique de la famille des alcools, se situe en bout de chaîne dans la molécule B, mais pas dans la molécule A.

2 Comparaison de molécules

Énoncé
p. 305

Lycée Édouard Herriot, Lyon

- 1** La formule brute de la molécule M est $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$.
- 2** Elle possède un groupe caractéristique « hydroxyle » ($-\text{OH}$), donc elle appartient à la famille des alcools.
- 3** Pour répondre sans se tromper à cette question, il faut au préalable noter que la molécule M consiste en une chaîne linéaire de quatre atomes de carbones, et que sur le deuxième carbone en partant d'une extrémité, se trouve le groupe « hydroxyle ».

MÉTHODE

Le groupe hydroxyle peut se trouver aussi bien sur le deuxième carbone à partir de la droite, que sur le deuxième carbone à partir de la gauche. Il s'agit dans les deux cas de la même molécule. Pour s'en convaincre, on peut imaginer qu'une personne regardant la formule semi-développée donnée dans l'énoncé depuis l'autre côté de la page, par transparence, verrait le groupe hydroxyle sur le deuxième atome à partir de la droite.

On identifie donc aisément que les molécules A, B et C sont identiques à la molécule M.

MÉTHODE

Le fait que le groupement hydroxyle soit représenté perpendiculairement à la chaîne (comme dans le cas de la molécule C) ou dans l'alignement de celle-ci (molécule A) n'a pas d'importance. En réalité les liaisons covalentes de la chaîne ne sont pas alignées (on le voit bien sur les modèles moléculaires éclatés), et les liaisons covalentes peuvent tourner librement sur leur axe. Ceci implique que les molécules représentées par la formule A et la formule C sont indiscernables.

De la même manière, les angles que font entre elles les liaisons carbone-carbone sur la formule B n'importent pas.

On voit donc également que la molécule F est identique à la molécule M. En revanche, les molécules D, E et G ne sont pas identiques à M : les molécules D et G n'ont pas une chaîne linéaire de carbones (on peut d'ailleurs noter que ces deux molécules sont identiques). Enfin, la molécule E a bien une chaîne linéaire de quatre atomes de carbone, mais le groupement hydroxyle se trouve sur le premier atome de carbone. On note toutefois que les molécules D, E et G ont toutes pour formule brute $C_4H_{10}O$. Ayant même formule brute que M mais des formules développées différentes, ce sont des isomères de M.

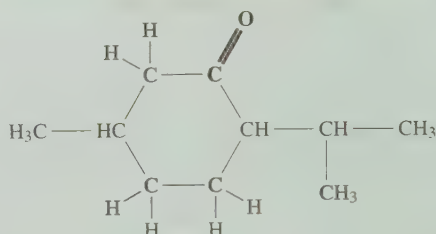


Molécule de menthone

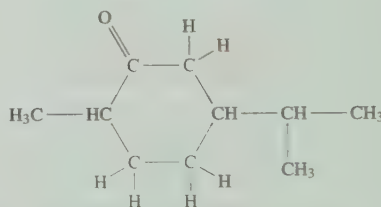
Enoncé
p. 306

Lycée Kléber, Strasbourg

1 La molécule de menthone est une cétone (ainsi que son nom l'indique). Nous représentons en gras son groupe caractéristique sur la formule semi-développée ci-contre.



2 Nous voyons sur la formule semi-développée que la molécule de menthone consiste essentiellement en un cycle de six atomes de carbone reliés par des liaisons simples, sur lequel se trouvent deux substituants sur des carbones opposés : un groupe méthyle (un atome de carbone) d'un côté, et un groupe propyle (trois atomes de carbone) de l'autre. Le carbone qui porte l'atome d'oxygène est voisin du l'atome de carbone portant le groupe propyle. C'est donc le modèle A qui représente la molécule de menthone. Le modèle B montre, quant à lui, une molécule où l'atome portant l'oxygène est voisin du groupe méthyle, laquelle a donc pour formule semi-développée celle ci-contre.



groupes caractéristiques

Enoncé
p. 306

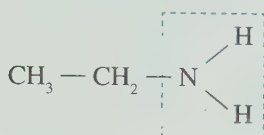
Lycée Romain Rolland, Ivry-sur-Seine

1	Nous avons :	Molécule A	Molécule B
	Nombre d'atomes dans la molécule	10	13
	Nombre d'éléments dans la molécule	3	3
	Nombre de liaisons simples	9	11
	Nombre de liaisons doubles	0	1
	Formule brute	C_2H_7N	C_4H_8O

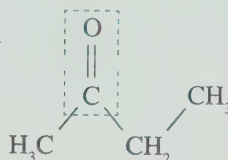
On prend garde au fait que toutes les liaisons simples ne sont pas représentées sur une formule semi-développée.

- 2 Les groupes caractéristiques des deux molécules sont entourés sur la figure ci-dessous.

molécule A



molécule B



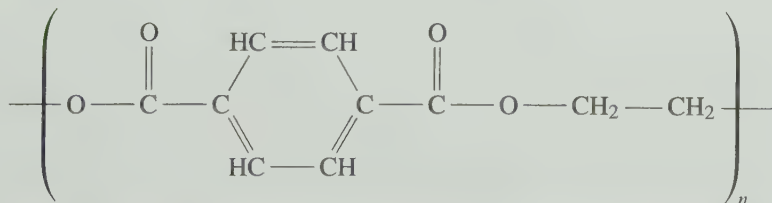
- 3 Le groupe caractéristique de la molécule A est celui des amines, et celui de la molécule B correspond à la famille des cétones.
- 4 La molécule A est la molécule d'éthylamine (c'est une amine, et elle possède deux atomes de carbone, d'où le préfixe « éthyl- »), tandis que la molécule B est la molécule de butanone (c'est une cétone, comme l'indique son suffixe, et elle possède quatre atomes de carbone, comme l'indique le préfixe « butan- »).
- 5 Ces molécules n'ont pas la même formule brute, donc elles ne sont pas isomères.

Motif de polymère

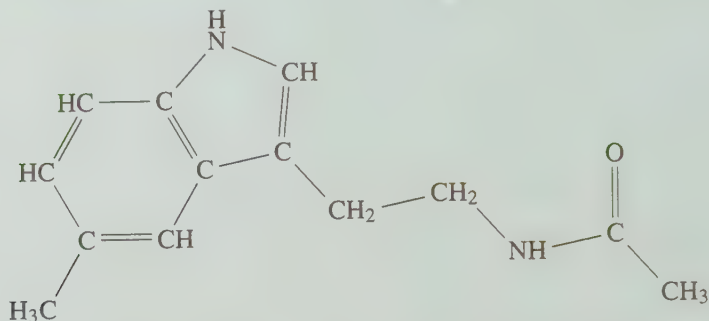
Enoncé
p. 307

Lycée Louis Pergaud, Besançon

- 1 Les atomes situés aux extrémités du motif sont ceux qui n'ont pas un nombre de liaisons égal à leur valence. Ils pourront donc contracter une autre liaison covalente pour s'« accrocher » au motif voisin. L'énoncé indique qu'il n'y a pas d'atomes cachés sur le modèle moléculaire éclaté. En l'occurrence on voit qu'il manque une liaison covalente à l'atome d'oxygène situé à l'extrémité gauche du motif, en bas, puisqu'il n'a qu'une liaison covalente (avec l'atome de carbone voisin). De la même manière il manque une liaison covalente à l'atome de carbone situé à l'extrémité droite du motif (puisque'il n'est engagé que dans trois liaisons covalentes). Ces deux atomes sont donc les atomes extrêmes du motif.
- 2 La formule semi-développée du polymère est donc :

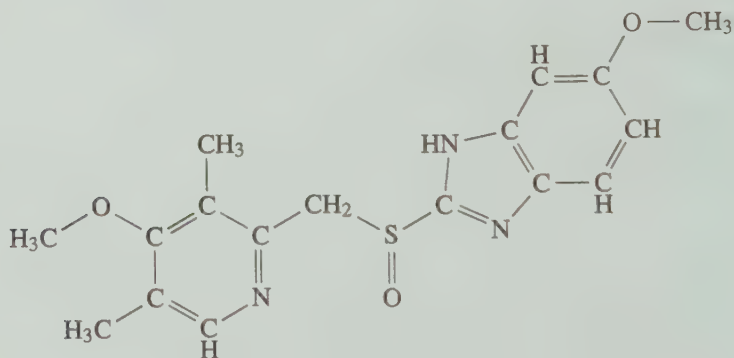


où n est un entier qui représente le nombre moyen de monomères contenu dans une molécule du polymère.

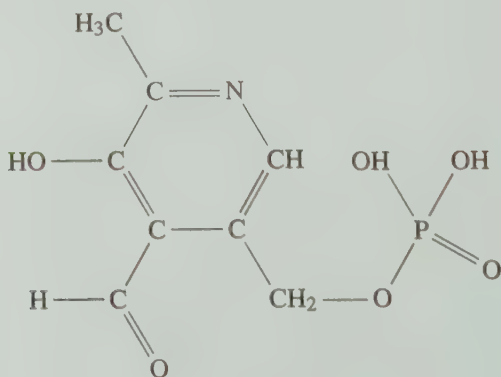


On note que trois atomes d'hydrogène sont cachés par effet de perspective sur le modèle moléculaire éclaté. Il convient de vérifier que la valence de chaque atome est satisfaite pour les trouver.

2 Molécule d'oméprazole



3 Molécule de vitamine B6

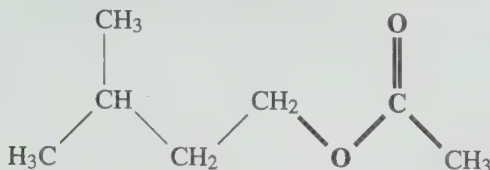


7 Arôme de banane

➔ **Énoncé**
p. 309

Lycée Louis Le Grand, Paris

- 1 La formule semi-développée de l'acétate de 3-méthylbutyle est :



- 2 On y reconnaît le groupe caractéristique des esters (montré en gras sur la formule développée ci-dessus). L'acétate de 3-méthylbutyle appartient donc à la famille des esters. ~
- 3 La densité correspond à la valeur numérique de la masse, exprimée en kilogrammes, d'un litre du liquide considéré. C'est aussi la masse, exprimée en grammes, d'un millilitre du liquide. Nous pouvons donc déduire que nous avons une masse :

$$m = 0,87 \text{ g}$$

d'acétate de 3-méthylbutyle dans le volume V .

Il nous faut à présent évaluer la masse molaire de la molécule d'acétate de 3-méthylbutyle pour évaluer la quantité de matière que l'on a dans le volume V . Pour ce faire, il nous faut déterminer la formule brute de la molécule. Celle-ci est $\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_2$. Sa masse molaire M s'en déduit par :

$$M = 7M(\text{C}) + 14M(\text{H}) + 2M(\text{O}) = 7 \times 12 + 14 + 2 \times 16 = 130 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Nous en déduisons la quantité de matière présente dans le volume V :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{0,87}{130} = 6,7 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

puis le nombre N de molécules auquel cela correspond :

$$N = n \times \mathcal{N}_A = 6,7 \times 10^{-3} \times 6,02 \times 10^{23} = 4,0 \times 10^{21} \text{ molécules.}$$

La mole.

Quantité de matière

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions

Thèmes : la santé, la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Jean Moulin, Lyon

Une bouteille contient $n = 4,46 \times 10^{-2}$ mol de molécules d'un gaz triatomique de masse totale 1,96 g. Quel est ce gaz sachant qu'il n'est composé que de deux éléments distincts dont l'un est le carbone ?

Données :

- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{F}) = 19 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{Ne}) = 20 \text{ g.mol}^{-1}$

Voir corrigé page 320

Cette section nous fait aborder la notion de quantité de matière, primordiale en chimie. Cette notion connaît des applications immédiates dans le domaine des gaz et des ions en solution.

2 Définitions

2.1 Quantité de matière

La *mole* est une unité servant à dénombrer de très grands ensembles de particules. Elle permet de faire la jonction entre les grandeurs de l'infiniment petit et celles du monde macroscopique, à notre échelle.

Définition 1

On appelle *mole d'entités élémentaires chimiques* (atomes, ions, molécules, ...) un ensemble de $6,02 \times 10^{23}$ de ces entités.

Cette constante de $6,02 \times 10^{23}$ est appelée *nombre d'Avogadro* ($\mathcal{N}_A$).

$\mathcal{N}_A$ correspond au nombre d'atomes de carbone présents dans 12,00 g de carbone.

À RETENIR

La constante d'Avogadro $\mathcal{N}_A$ vaut : $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Définition 2

On appelle *quantité de matière* d'un échantillon le nombre de moles présentes dans cet échantillon.

Son unité est la *mole* (mol).

Exemples :

- La quantité de matière n d'un gramme d'eau vaut 0,06 mol.
- Pour un gramme de carbone 12 : $n = \frac{1}{12} = 0,08 \text{ mol}$.

Ainsi, une mole est un « paquet » d'entités. Une mole contient un nombre précis et toujours identique de molécules, d'ions ou d'atomes.

Le lien entre la quantité de matière n et le nombre d'entités N considérés est :

$$N = n \times \mathcal{N}_A,$$

où $\mathcal{N}_A$, la « taille d'un paquet », est la constante d'Avogadro.

Ainsi, par exemple, dire qu'on considère une mole de NH_3 revient à dire qu'on considère $6,02 \times 10^{23}$ molécules de NH_3 . En outre on voit que dans une mole de NH_3 , on a une mole de N et trois moles de H.

ATTENTION

Il faut toujours préciser de quelle entité élémentaire on considère la quantité de matière.

Définition 3

On appelle *masse molaire* d'une entité la masse d'une mole de cette entité.

La masse molaire s'exprime en grammes par mole ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$). Elle est notée M .

Exemple : la masse molaire du carbone 12 vaut exactement $12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ (définition de la mole).

Plus généralement, la masse molaire d'un élément, exprimée en grammes par mole, est toujours très proche de son nombre de masse, ce qui justifie ici son appellation.

La masse molaire d'un composé moléculaire est la masse d'une mole de molécules. Elle est égale à la somme des masses molaires atomiques de tous les atomes qui composent la molécule.

Définition 4

On appelle *volume molaire* d'un corps pur le volume occupé par *une mole* d'atomes ou de molécules de ce corps pur.

Le volume molaire est noté V_m . Il est exprimé en litres par mole ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Le volume molaire d'un gaz à la température de 0°C et à la pression atmosphérique standard est égal à $22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$. Ce volume est *indépendant* de la nature du gaz.

À la pression atmosphérique standard et pour une température de 25°C , le volume molaire d'un gaz (indépendamment de sa nature) est $24 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Enfin, il est important de connaître parfaitement la relation liant la masse, la quantité de matière, et la masse molaire.

À RETENIR

La quantité de matière n d'un échantillon d'une espèce chimique de masse m et de masse molaire M est :

$$n = \frac{m}{M}$$

où n est en mol, m en g et M en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

2.2 Densité

Définition 5

On appelle *densité* d'un corps le quotient de sa masse volumique avec celle de l'eau. C'est un nombre sans dimension.

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{eau}}}, \quad \text{sans unité.}$$

La densité de l'eau vaut donc 1 par définition.

Remarque : en toute rigueur, on devrait dire *densité par rapport à l'eau*.

Exemple : considérons le mercure. Sa masse volumique est $\rho_{\text{Hg}} = 13,6 \text{ g.cm}^{-3}$. Par ailleurs, celle de l'eau est $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$. La densité du mercure est donc :

$$d_{\text{Hg}} = \frac{\rho_{\text{Hg}}}{\rho_{\text{eau}}} = 13,6$$

On voit sur cet exemple que la valeur numérique de la densité peut être directement reliée à celle de la masse volumique.

À RETENIR

La densité d'un corps par rapport à l'eau est égale à la valeur numérique de la masse en gramme d'un centimètre cube de ce corps. C'est aussi la valeur numérique de la masse en kilogramme d'un décimètre cube (ou d'un litre).

Nous pouvons en déduire les relations suivantes, qui sont valables lorsque le volume V est en cm^3 et la masse m en gramme (ou bien lorsque le volume est en dm^3 et la masse en kilogramme) :

$$d = \frac{m}{V}, \quad m = d \times V \quad \text{et} \quad V = \frac{m}{d}$$

Solution de l'exercice type

Lycée Jean Moutin, Lyon

Nous pouvons à présent résoudre l'exercice type.

La masse du gaz étant 1,96 g, sa masse molaire est

$$M = \frac{1,96}{4,46 \times 10^{-2}} \approx 44 \text{ g.mol}^{-1}.$$

Le gaz étant triatomique et l'un des éléments étant le carbone, sa formule est soit C_2X soit CX_2 , où X est l'élément inconnu, puisqu'on sait qu'il ne comporte que deux éléments.

Premier cas : on suppose que la formule du gaz est C_2X . Alors sa masse molaire est : $M = 2M(\text{C}) + M(\text{X}) = 44 \text{ g.mol}^{-1}$. Puisque $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$, on en déduit que $M(\text{X}) = 44 - 2 \times 12 = 20 \text{ g.mol}^{-1}$. C'est la masse molaire du néon Ne. Or le néon est un gaz noble, il est donc naturellement à l'état atomique et ne peut s'associer à d'autres atomes pour former des molécules. Ce premier cas doit donc être éliminé.

Second cas : on suppose que la formule du gaz est CX_2 . Alors sa masse molaire est : $M = M(\text{C}) + 2M(\text{X}) = 44 \text{ g.mol}^{-1}$. Puisque $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$, on en déduit que $M(\text{X}) = \frac{44 - 12}{2} = 16 \text{ g.mol}^{-1}$. C'est la masse molaire de l'oxygène. La formule du gaz est donc CO_2 . C'est le dioxyde de carbone.

Voir énoncé page 317

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 328

- 1** À votre avis, dans un sac de 50 kg de riz, le nombre de grains de riz est :
☐ a très inférieur à une mole.
☐ b de l'ordre d'une mole.
☐ c très supérieur à une mole.
- 2** La notion de mole sert à :
☐ a peser ☐ b compter ☐ c classier
- 3** La valeur de la constante d'Avogadro est environ :
☐ a $6,02 \times 10^{22} \text{ mol}^{-1}$ ☐ b $6,23 \times 10^{25} \text{ mol}^{-1}$ ☐ c $6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- 4** Dans une mole de dioxyde de carbone, il y a :
☐ a une ☐ b deux
 moles d'atomes d'oxygène.

2 Atome de fer

10 min

Corrigé
p. 328**Lycée Turgot, Paris**

- 1** Quelle est la composition du noyau de l'atome de fer $^{56}_{26}\text{Fe}$? Comment s'appellent les nombres 56 et 26 ?
- 2** Calculer la masse du noyau de cet atome puis calculer la masse de l'atome. Que peut-on en conclure ?
- 3** Combien y a-t-il d'atomes de fer dans un échantillon de fer ayant un volume de $5,0 \text{ cm}^3$?

Données : • $m_{\text{proton}} \approx m_{\text{neutron}} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 • $m_{\text{électron}} = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 • Densité du fer : $\rho = 7,8$

3 Chloroéthane

15 min

Corrigé
p. 329**Lycée Notre-Dame des Missions, Charenton**

Le chloroéthane est un anesthésique gazeux à température ambiante. Une mole de chloroéthane contient deux moles de carbone, cinq moles d'hydrogène et une mole de chlore.

- 1** Quelle est la masse molaire de cette molécule ?
- 2** Quelle est la formule brute du chloroéthane ?
- 3** Donner la formule développée du chloroéthane.

Données : • $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
 • $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$

4 **Carbone 14**

2 min

Corrigé
p. 329**Lycée La Bruyère, Versailles**

Le carbone 14 est un isotope rare du carbone. La formule du noyau de carbone 14 est ${}^{14}_6\text{C}$.

Le nombre d'entités élémentaires qu'il y a dans 12 g de carbone 14 est :

- 1 égal au nombre d'Avogadro.
- 2 inférieur au nombre d'Avogadro.
- 3 supérieur au nombre d'Avogadro.

5 **Masses molaires**

10 min

Corrigé
p. 329**Lycée Albert Sorel, Honfleur**

Calculer la masse molaire des corps composés suivants :

- 1 Le dioxyde de carbone CO_2 .
- 2 Le trioxyde soufre SO_3 .
- 3 Le glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$

Données : • $M(\text{C}) = 12,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. • $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.
 • $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. • $M(\text{S}) = 32,1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

6 **Ordre de grandeur**

5 min

Corrigé
p. 330**Lycée Gabriel Deshayes, Saint-Gildas-des-Bois**

Sur Terre, y a-t-il

- 1 plus d'une mole de molécules d'eau dans l'ensemble des océans ?
- 2 plus d'une mole d'êtres humains sur l'ensemble de tous les continents ?

7 **Dichlorométhane**

10 min

Corrigé
p. 330**Lycée Alexandre Dumas, Saint Cloud**

Le dichlorométhane, de formule brute CH_2Cl_2 est un solvant non miscible à l'eau, souvent utilisé en chromatographie.

- 1 La masse d'un volume $V = 25,0 \text{ mL}$ de dichlorométhane est $m = 33,3 \text{ g}$. Déterminer la densité du dichlorométhane.
- 2 On souhaite isoler une masse $m' = 55,0 \text{ g}$ de dichlorométhane. On ne dispose pas d'une balance, mais d'une éprouvette graduée. Quel volume de solvant doit-on mesurer ?

9 Échantillon de fer

★★

5 min

→ Corrigé
p. 330**Lycée Passy-Bezenval, Rueil-Malmaison**Un cube de fer de côté $a = 5 \text{ cm}$ contient $N = 1,06 \times 10^{25}$ atomes.

- 1 Quelle est la masse d'un atome de fer ?
- 2 Quelle est la masse du cube de fer ?
- 3 Quel est le volume du cube de fer ?
- 4 En déduire la densité du fer.

Données :

- Nombre de masse du fer : $A = 56$
- Masse d'un nucléon : $m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

9 Molécule de nicotine

★★

10 min

→ Corrigé
p. 331**Lycée Henri IV, Paris**La molécule de nicotine a pour formule brute $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2$.

- 1 Quelle est la masse molaire moléculaire de la nicotine ?
- 2 Une cigarette contient $m = 12 \text{ mg}$ de nicotine. Le fumeur en absorbe le quart. Combien de molécules de nicotine passent dans son organisme ?

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- Constante d'Avogadro : $\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

10 Alcool à brûler

★★

10 min

→ Corrigé
p. 331**Lycée Saint François de Sales, Évreux**

Une bouteille contenant 1,00 L d'alcool à brûler a une masse de 838 g.

Sa masse à vide est 49,0 g.

- 1 Calculer la masse d'alcool contenue dans la bouteille.
- 2 Déterminer la densité de l'alcool à brûler.

11 Le saccharose

★★

5 min

→ Corrigé
p. 331**Lycée Hector Berlioz, Vincennes**Le saccharose qui constitue le sucre que l'on utilise pour sucrer son café a pour formule $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$. Calculer le nombre de moles de saccharose contenues dans 5,0 grammes de sucre.

Données :

- $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$

12 Tétrachlorométhane

★★

10 min

Corrigé
p. 332**Lycée Charlemagne, Paris**

On considère un volume $V = 100 \text{ mL}$ de tétrachlorométhane CCl_4 liquide.

- 1** Quelle quantité de matière en tétrachlorométhane cela représente-t-il ?
- 2** Quel est le nombre d'atomes de chlore correspondant ?

Données : • La densité du tétrachlorométhane est $d = 1,6$.

- La constante d'Avogadro est : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
- Masse molaire atomique du carbone : $M(\text{C}) = 12,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Masse molaire atomique du chlore : $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

13 Molécule d'éthanol

★★

10 min

Corrigé
p. 332**Lycée Louis Le Grand, Paris**

La molécule d'éthanol a pour formule $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$.

- 1** Calculer sa masse molaire.
- 2** Quels sont les pourcentages (en masse) du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène dans l'éthanol ?
- 3** Calculer la masse d'une molécule d'éthanol.

Données : • $M(\text{H}) = 1,0$ • $M(\text{C}) = 12$ • $M(\text{O}) = 16$

14 Masse de dioxygène

★★

5 min

Corrigé
p. 333**Lycée Henri IV, Paris**

Calculer la quantité de matière en dioxygène contenue dans une enceinte de volume $44,0 \text{ L}$. En déduire la masse de dioxygène contenue dans le flacon.

- Données :** • $M(\text{O}) = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- Le volume occupé par une mole de dioxygène dans les conditions de l'expérience est $22,0 \text{ L}$.

15 Mélange de deux gaz

★★

10 min

Corrigé
p. 333**Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne**

On considère $m_{\text{O}_2} = 100$ grammes de dioxygène et $m_{\text{CO}_2} = 100$ grammes de dioxyde de carbone.

- 1** Calculer les masses molaires moléculaires de chacun de ces deux gaz.
- 2** On les mélange à l'intérieur d'une enceinte. Dans cette enceinte, quelle est la quantité de matière :

- (a) en atomes de carbone ? (b) en atomes d'oxygène ?

- Données :** • $M(\text{C}) = 12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

16 Molécule inconnue

★★★

15 min

Corrigé
p. 334**Lycée Saint-Louis, Paris**

On considère une molécule dont la masse molaire est $45,0 \text{ g.mol}^{-1}$. Son atomicité (nombre total d'atomes dans la molécule) est égal à 10.

- 1 Quelle est sa formule brute, sachant qu'elle ne contient que des atomes de carbone, d'azote et d'hydrogène ?
- 2 Proposer deux formules semi-développées possibles pour cette molécule.

Données : $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$ $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
 $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'azote trivalent et l'hydrogène monovalent.

17 Vapeur d'eau

★★★

10 min

Corrigé
p. 334**Lycée Talensac, Nantes**

On considère de la vapeur d'eau à 100°C et à la pression atmosphérique (dans ces conditions, une mole de molécules d'eau occupe un volume $V = 30,6 \text{ L}$). Quel volume d'eau liquide obtient-on si on condense $61,2 \text{ L}$ de cette vapeur d'eau ?

18 Identifier une molécule

★★★

5 min

Corrigé
p. 335**Lycée International Stendhal, Grenoble**

Une molécule a pour masse molaire 44 g.mol^{-1} . Quelle est sa formule brute sachant qu'elle est composée d'atomes d'hydrogène et de trois atomes de carbone ?

Données : $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$ $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$

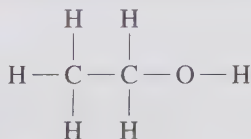
19 Molécule d'éthanol

★★★

5 min

Corrigé
p. 335**Lycée Paul Valéry, Montpellier**

L'éthanol a pour formule $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$. Sa formule développée est donnée ci-dessous :



- 1 Quelle est sa masse molaire ?
- 2 Combien y a-t-il de moles d'éthanol dans 200 grammes d'éthanol ?
- 3 Combien y a-t-il de moles d'éthanol dans un litre d'éthanol sachant que la densité de l'éthanol est $d = 0,8$.

Données : $M(\text{H}) = 1,0$ $M(\text{O}) = 16$ $M(\text{C}) = 12$

20 Composé organique

★★★

15 min

Corrigé
p. 335

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Un composé organique formé de carbone, d'hydrogène et d'azote a la composition centésimale, en masse : $\%C = 38,7$; $\%H = 16,1$; $\%N = 45,2$.

Sa masse molaire vaut $31 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

- 1 Calculer les masses de carbone, d'hydrogène et d'azote contenues dans une mole du composé.
- 2 En déduire sa formule.
- 3 Rechercher la seule possibilité pour la formule développée de la molécule.

Données : • $M(H) = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ • $M(N) = 14 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
• $M(C) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

On rappelle que le carbone est tétravalent, l'azote trivalent et l'hydrogène monovalent.

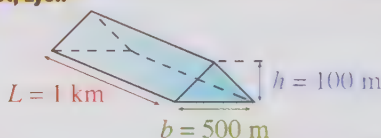
21 Grains de sable

★★★

20 min

Corrigé
p. 336

Lycée Édouard Herriot, Lyon



La dune du Pyla, sur le bassin d'Arcachon, est la plus grande de France. On la représente par un prisme couché, dont les dimensions sont données ci-dessus. On suppose qu'elle est constituée de grains de sable identiques, sphériques et de diamètre égal à $0,2 \text{ mm}$. On néglige le volume interstitiel entre les grains de sable.

- 1 Combien de moles de grains de sable y a-t-il dans la dune du Pyla ?
- 2 Sachant que la densité du quartz, qui constitue les grains, est $d = 2,5$, calculer la masse molaire de l'entité « grain de sable ».

Donnée : volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$.

22 Solution d'éthanol

★★★

15 min

Corrigé
p. 337

Lycée Victor Duruy, Paris

L'éthanol est un liquide de densité $0,79$. Sa formule brute est C_2H_6O .

- 1 Quel volume occupe $0,50 \text{ mol}$ d'éthanol pur liquide ?
- 2 Un litre d'alcool à 90° contient 900 cm^3 d'éthanol pur et de l'eau pure. Quel est le volume d'un alcool à 90° contenant $0,50 \text{ mol}$ d'éthanol ?

Données : • $M(C) = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ • $M(H) = 1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
• $M(O) = 16 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

23 Quantités de matière

★★★

20 min

Corrigé
p. 337**Institut de la Tour, Paris**

- 1** Quelles quantités de matière y a-t-il dans :
- (a) 36 grammes d'eau ?
 - (b) 48 grammes de carbone ?
 - (c) 31 grammes de plomb ?
- 2** Quelles quantités de matière y a-t-il dans $5,0 \text{ cm}^3$:
- (a) d'eau
 - (b) d'ammoniac liquide NH_3 à $-33,4^\circ\text{C}$ (densité 0,68).
 - (c) de benzène C_6H_6 (densité 0,88).

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{Pb}) = 207 \text{ g.mol}^{-1}$

24 Plus léger que l'air

★★★

15 min

Corrigé
p. 338**Lycée Marie Curie, Sceaux**

Dans les conditions ordinaires (17°C et $1,013 \text{ bar}$) le volume molaire de n'importe quel gaz vaut $V_M = 23,8 \text{ L.mol}^{-1}$.

- 1** Pour les gaz suivants : H_2 , CO_2 , O_2 , N_2 , He
- (a) Calculer la masse molaire.
 - (b) Calculer la densité par rapport à l'eau.
- 2** Sachant que, dans les mêmes conditions la densité de l'air est $d_{\text{air}} = 1,2 \times 10^{-3}$, en déduire quels sont les gaz utilisables pour gonfler un dirigeable. Justifier la réponse.

Données :

- $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{He}) = 4,0 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$

1 **Testez vos connaissances**Enoncé
p. 321

- 1 a. En supposant qu'un grain de riz pèse 0,1 g, il y aurait :
- $$50 \times 10 \times 10^3 = 5 \times 10^5 \text{ grains de riz dans le sac,}$$
- ce qui est très inférieur à N_A .
- 2 b. Une mole d'une entité c'est le nombre d'Avogadro de cette entité.
- 3 c. $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
- 4 b. La formule du dioxyde de carbone est CO_2 .

2 **Atome de fer**Enoncé
p. 321

Lycée Turgot, Paris

- 1 L'écriture ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ indique que l'atome de fer comporte 26 protons (et donc 26 électrons pour assurer sa neutralité électrique). En outre son noyau comprend 56 nucléons, donc $56 - 26 = 30$ neutrons. Le nombre 56 s'appelle le nombre de nucléons. Le nombre 26 s'appelle le numéro atomique.

- 2 La masse du noyau est égale à :

$$m_{\text{noyau}} = Zm_p + (A - Z)m_n \approx Zm_p + (A - Z)m_p = Am_p.$$

L'application numérique donne :

$$m_{\text{noyau}} = 56 \times 1,67 \times 10^{-27} = 9,352 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

La masse de l'atome est obtenue en rajoutant la masse des électrons, qui est :

$$m_{\text{électron}} = Zm_e = 26 \times 9,1 \times 10^{-31} = 2,366 \times 10^{-29} \text{ kg.}$$

On voit qu'elle est plus de mille fois inférieure à la masse du noyau, donc la masse des électrons est complètement négligeable comparée à celle de l'atome et on a :

$$m_{\text{noyau}} = m_{\text{atome}}.$$

- 3 Dans $5,0 \text{ cm}^3$ de fer on a une masse de $7,8 \times 5,0 = 39 \text{ g} = 0,039 \text{ kg}$ de fer. La masse d'un atome de fer étant $m_{\text{atome}} = 9,35 \times 10^{-26} \text{ kg}$, et si on appelle N le nombre d'atomes de fer, alors :

$$N = \frac{0,039}{9,35 \times 10^{-26}} = 4,2 \times 10^{23} \text{ atomes.}$$

MÉTHODE

Ici il serait maladroit de passer par la masse molaire du fer et d'utiliser la constante d'Avogadro, qui n'est pas donnée dans l'énoncé. Il vaut mieux utiliser les données indiquées et utiliser les grandeurs microscopiques.

3 Chloroéthane

➔ **Énoncé**
p. 321

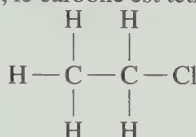
Lycée Notre-Dame des Missions, Charenton

- 1 La masse molaire du chloroéthane, compte-tenu des indications données dans l'énoncé, vaut :

$$M = 2M(\text{C}) + 5M(\text{H}) + M(\text{Cl}) = 2 \times 12 + 5 + 35,5 = 64,5 \text{ g.mol}^{-1}$$

- 2 La formule brute du chloroéthane est simplement donnée par les proportions de l'énoncé (en les divisant par le nombre d'Avogadro, ce dernier se lit : « une molécule de chloroéthane contient deux atomes de carbone, cinq atomes d'hydrogène et un atome de chlore »). Elle est donc $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$.

- 3 La seule formule développée possible correspondant à cette formule brute, compte-tenu de la valence des différents atomes (le chlore et l'hydrogène sont monovalents, le carbone est tétravalent) :



4 Carbone 14

➔ **Énoncé**
p. 322

Lycée La Bruyère, Versailles

Réponse 2. Chaque atome de carbone 14 est un peu plus lourd qu'un atome de carbone 12, et donc pour une masse égale, on en a un peu moins. Or le nombre d'atomes de carbone 12 qu'il y a dans 12 g de carbone 12 est précisément égal au nombre d'Avogadro, donc le nombre d'entités élémentaires contenues dans 12 g de carbone 14 est inférieur au nombre d'Avogadro. Notons que c'est le même type de raisonnement que celui qui consiste à dire qu'un kilogramme de pommes lourdes contient moins de pommes qu'un kilogramme de pommes légères.

5 Masses molaires

➔ **Énoncé**
p. 322

Lycée Albert Sorel, Honfleur

- 1 La masse molaire de la molécule de dioxyde de carbone est égale à la somme des masses molaires de chacun des atomes présents, multipliées par le nombre d'atomes correspondants dans la molécule :

$$M_{\text{CO}_2} = M(\text{C}) + 2M(\text{O}) = 12,0 + 16,0 \times 2 = 12,0 + 32,0 = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

- 2 De la même manière :

$$M_{\text{SO}_3} = M(\text{S}) + 3M(\text{O}) = 32,1 + 16,0 \times 3 = 32,1 + 48,0 = 80,1 \text{ g.mol}^{-1}$$

- 3 Enfin, la masse molaire moléculaire du glucose est donnée par :

$$\begin{aligned} M_{\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6} &= 6M(\text{C}) + 12M(\text{H}) + 6M(\text{O}) = 12 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 \\ &= 180 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

6 Ordre de grandeur

Enoncé
p. 322

Lycée Gabriel Deshayes, Saint-Gildas-des-Bois

- Oui. La masse molaire de l'eau étant de 18 g.mol^{-1} , et la masse des océans représentant évidemment beaucoup plus de 18 g, il y a plus d'une mole de molécules d'eau dans les océans.
- Non. Nous sommes moins de 10 milliards d'êtres humains sur la planète, ce qui représente un nombre très inférieur au nombre d'Avogadro :

$$10 \times 10^9 = 10^{10} \ll 6,02 \times 10^{23}.$$

7 Dichlorométhane

Enoncé
p. 322

Lycée Alexandre Dumas, Saint Cloud

- La densité du dichlorométhane est donnée par :

$$d = \frac{m}{V} = \frac{33,3}{25,0} = 1,33 \text{ g.mL}^{-1} = 1,33$$

- On utilise la densité pour déterminer le volume correspondant. Nous avons :

$$V = \frac{m}{d} = \frac{55,0}{1,33} = 41,4 \text{ cm}^3 = 41,4 \text{ mL}.$$

Il nous faut prélever 41,4 mL du solvant.

8 Échantillon de fer

Enoncé
p. 323

Lycée Passy-Bezenval, Rueil-Malmaison

- La masse d'un atome de fer est à peu près égale à celle de ses nucléons (la masse des électrons est négligeable). Il y a $A = 56$ nucléons dans le noyau d'un atome de fer, donc la masse d'un atome de fer est :

$$m = A \times m_n = 56 \times 1,67 \times 10^{-27} \approx 9,35 \times 10^{-26} \text{ kg} = 9,35 \times 10^{-23} \text{ g}.$$

- La masse du cube de fer est donc :

$$m_{\text{cube}} = N \times m = 1,06 \times 10^{25} \times 9,35 \times 10^{-23} \approx 990 \text{ g}.$$

- Le volume du cube de fer est : $V = a^3 = 5^3 = 125 \text{ cm}^3$.

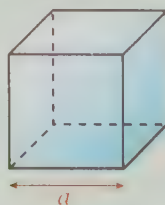


Figure 14.1 – Le volume de ce cube est a^3 .

- 4 La densité du fer s'en déduit par :

$$d = \frac{M_{\text{cube}}}{V} = \frac{990}{125} \approx 7,9$$

car la masse est en gramme et le volume en cm^3 .

Molécule de nicotine

→ Enoncé
p. 323

Lycée Henri IV, Paris

- 1 La masse molaire moléculaire de la nicotine est donnée par :

$$M = 10M(\text{C}) + 14M(\text{H}) + 2M(\text{N}) = 10 \times 12 + 14 + 2 \times 14 = 162 \text{ g.mol}^{-3}.$$

- 2 La quantité de matière en nicotine présente dans la cigarette est :

$$n = \frac{m}{M},$$

donc la quantité de matière absorbée par le fumeur est

$$n' = \frac{n}{4} = \frac{m}{4 \times M},$$

qui représente au total un nombre de molécules N égal à :

$$N = \mathcal{N}_A \times n' = \mathcal{N}_A \times \frac{m}{4 \times M} = 6,02 \times 10^{23} \times \frac{12 \times 10^{-3}}{4 \times 162} = 1,1 \times 10^{19}.$$

Alcool à brûler

→ Enoncé
p. 323

Lycée Saint François de Sales, Évreux

- 1 La masse d'alcool contenue dans la bouteille est :

$$m_{\text{alcool}} = 838 - 49,0 = 789 \text{ g.}$$

- 2 On en déduit la densité d de l'alcool à brûler. Notons qu'il faut soit convertir le volume en cm^3 , soit la masse en kilogrammes, pour pouvoir utiliser les relations vues en cours. Nous avons $m_{\text{alcool}} = 0,789 \text{ kg}$. En notant $V = 1,00 \text{ L}$ le volume de la bouteille, nous obtenons :

$$d = \frac{m_{\text{alcool}}}{V} = 0,789$$

Le saccharose

→ Enoncé
p. 323

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

Calculons la masse molaire M moléculaire du saccharose. Celle-ci s'écrit :

$$M = 12 \times M(\text{C}) + 22 \times M(\text{H}) + 11 \times M(\text{O}) = 342 \text{ g.mol}^{-1}.$$

Donc 5 grammes de saccharose représentent :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{5,0}{342} = 1,5 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

de molécules de saccharose.

12 Tétrachlorométhane

➔ **Enoncé**
p. 324

Lycée Charlemagne, Paris

- 1 On commence par calculer la masse de tétrachlorométhane. Elle vaut :

$$m = V \times d$$

MÉTHODE

Le volume étant ici en mL (ou cm^3 , cela revient au même), on obtient la masse en grammes.

Nous avons :

$$m = 100 \times 1,6 = 160 \text{ g.}$$

Maintenant que nous avons la masse, nous pouvons calculer la quantité de matière à partir de la masse molaire. Celle-ci vaut :

$$M = M(\text{C}) + 4M(\text{Cl}) = 12 + 4 \times 35,5 = 154 \text{ g.mol}^{-1}.$$

La quantité de matière en tétrachlorométhane est donc :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{160}{154} \approx 1,04 \text{ mol.}$$

- 2 La quantité de matière en atomes de chlore est $4n$ (il y a quatre atomes de chlore pour une entité « tétrachlorométhane »). Le nombre d'atomes correspondant est :

$$N = 4n \times \mathcal{N}_A = 4 \times 1,04 \times 6,02 \times 10^{23} \approx 2,5 \times 10^{24}.$$

13 Molécule d'éthanol

➔ **Enoncé**
p. 324

Lycée Louis Le Grand, Paris

- 1 La masse molaire de l'éthanol est :

$$M = 2 \times M(\text{C}) + 6 \times M(\text{H}) + M(\text{O}) = 46,0 \text{ g.mol}^{-1}.$$

- 2 Dans une mole d'éthanol (donc 46,0 g), il y a $2 \times 12,0 = 24,0$ g de carbone, 6,0 g d'hydrogène et 16,0 g d'oxygène. Les fractions massiques sont donc

$$f(\text{C}) = \frac{24,0}{46,0} = 0,52 = 52\%,$$

$$f(\text{H}) = \frac{6,0}{46,0} = 0,13 = 13\%,$$

$$f(\text{O}) = \frac{16,0}{46,0} = 0,35 = 35\%.$$

Pour s'assurer du résultat, on peut vérifier que la somme de ces fractions fait bien 100 %.

- 3** La masse d'une mole d'éthanol est 46,0 g. Or dans une mole il y a N_A molécules, $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ étant le nombre d'Avogadro. La masse d'une molécule d'éthanol est par conséquent :

$$m_{C_2H_6O} = \frac{M}{N_A} = 7,64 \times 10^{-23} \text{ g.}$$

Notons qu'il est recommandé de connaître par cœur le nombre d'Avogadro.

14 Masse de dioxygène

Enoncé
p. 324

Lycée Henri IV, Paris

On constate que le volume de l'enceinte est égal au double du volume occupé par une mole. Nous avons donc deux moles de dioxygène dans l'enceinte : $n = 2 \text{ mol}$.

La masse de dioxygène est alors donnée par :

$$m = nM(O_2) = 2 \times 2 \times 16 = 64 \text{ g.}$$

15 Mélange de deux gaz

Enoncé
p. 324

Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne

- 1** Les masses molaires moléculaires s'évaluent de la manière suivante :

$$M(O_2) = 2 \times 16,0 = 32,0 \text{ g.mol}^{-1},$$

$$M(CO_2) = 12,0 + 2 \times 16,0 = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}.$$

- 2** Les quantités de matière respectives des deux molécules dans l'enceinte sont :

$$n_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} = \frac{100}{32,0} = 3,13 \text{ mol}$$

et

$$n_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}} = \frac{100}{44,0} = 2,27 \text{ mol.}$$

- (a) On en déduit la quantité de matière en atomes de carbone. Elle vaut simplement :

$$n_C = n_{CO_2} = 2,27 \text{ mol,}$$

puisque l'on a une mole d'atomes de carbone par mole de molécules de dioxyde de carbone.

- (b) La quantité de matière en atomes d'oxygène s'en déduit par :

$$n_O = 2n_{O_2} + 2n_{CO_2} = 2 \times 3,13 + 2 \times 2,27 = 10,8 \text{ mol,}$$

puisque l'on a deux moles d'atomes d'oxygène par mole de molécules de dioxygène, et deux moles d'atomes d'oxygène par mole de molécules de dioxyde de carbone.

16 Molécule inconnue

Enoncé
p. 325

Lycée Saint-Louis, Paris

- 1 On note $C_xN_yH_z$ la formule brute, où x , y et z sont des inconnues entières, telles que :

$$x + y + z = 10$$

d'une part (en utilisant l'information sur l'atonicité), et

$$12x + 14y + z = 45$$

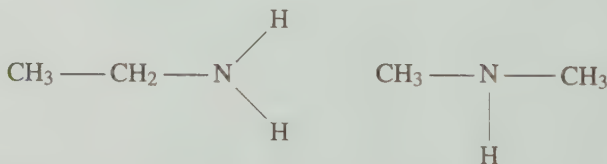
d'autre part (en utilisant l'information sur la masse molaire). En soustrayant la première équation de la seconde, nous obtenons :

$$11x + 13y = 35,$$

ce qui nous permet d'éliminer l'inconnue z . Il nous faut trouver une (ou des) solution(s) entière(s) à cette dernière équation. Pour ce faire, nous essayons différentes valeurs entières de x (inférieures à 10, atonicité de la molécule) et cherchons pour quelle(s) valeur(s) nous obtenons une valeur entière de y . Nous constatons que la seule solution pour laquelle x et y sont tous deux entiers est : $x = 2$ et $y = 1$. On en déduit $z = 10 - 2 - 1 = 7$, donc la formule brute de la molécule est :



- 2 Deux formules semi-développées possibles pour cette molécule sont les suivantes :



On vérifie bien que la valence du carbone est quatre, celle de l'azote est trois et celle de l'hydrogène est un.

17 Vapeur d'eau

Enoncé
p. 325

Lycée Talensac, Nantes

On constate que le volume à condenser est égal au double du volume occupé par une mole, donc nous condensenons $n = 2$ mol de molécules d'eau.

La masse molaire de l'eau est $M = M(O) + 2M(H) = 18,0 \text{ g.mol}^{-1}$, donc cela représente une masse d'eau égale à :

$$m = M \times n = 18,0 \times 2 = 36 \text{ g.}$$

Cela représente donc en définitive 36 cm^3 d'eau, puisque la densité de l'eau vaut 1,00 par définition.

18 Identifier une molécule→ **Énoncé**
p. 325**Lycée International Stendhal, Grenoble**

La formule brute de la molécule est *a priori*, d'après les données de l'énoncé, C_3H_x , et donc sa masse molaire est :

$$M = 3M(C) + xM(H) = 3 \times 12 + 1 \times x = 36 + x \text{ g.mol}^{-1}.$$

Or on sait que $M = 44 \text{ g.mol}^{-1}$, donc :

$$36 + x = 44,$$

ce qui donne $x = 8$. La formule brute de la molécule est donc C_3H_8 . Il s'agit d'une molécule de propane.

19 Molécule d'éthanol→ **Énoncé**
p. 325**Lycée Paul Valéry, Montpellier**

- 1** La masse molaire de l'éthanol est donnée par :

$$\begin{aligned} M(C_2H_6O) &= 2M(C) + 6M(H) + M(O) = 2 \times 12,0 + 6 \times 1,0 + 16,0 \\ &= 46,0 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

2 $n = \frac{m}{M} = \frac{200}{46} = 4,35 \text{ mol d'éthanol.}$

- 3** Un litre d'éthanol a une masse $m = d \times V = 800 \text{ g}$.
La quantité de matière correspondante vaut :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{800}{46} = 17,4 \text{ mol.}$$

20 Composé organique→ **Énoncé**
p. 326**Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison**

- 1** La masse de carbone contenue dans une mole du composé est 38,7 % de la masse molaire du composé, donc elle vaut $31 \times 0,387 = 12 \text{ g}$.
De la même manière, il y a $31 \times 0,161 = 5,0 \text{ g}$ d'hydrogène dans une mole du composé, et $31 \times 0,452 = 14 \text{ g}$ d'azote.
- 2** Par définition, douze grammes de carbone (^{12}C) contiennent une mole de carbone donc une mole du composé contient une mole d'atomes de carbone. De la même manière, un gramme d'atomes d'hydrogène représente une mole d'atomes d'hydrogène, donc une mole du composé contient cinq moles d'atomes d'hydrogène, et, puisque la masse molaire de l'azote est $M(N) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$, une mole du composé contient une mole d'atomes d'azote.

Or on sait que les raisonnements sur les moles peuvent être transposés en raisonnements sur les molécules, donc on peut dire qu'une molécule du composé contient un atome de carbone, cinq atomes d'hydrogène et un atome d'azote. Sa formule est donc CNH_5 .

- 3 La formule développée de la molécule dont la formule brute est donnée à la réponse précédente, et qui respecte la valence de chaque atome, est la suivante :

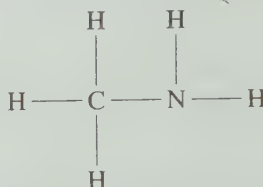


Figure 14.2 – Formule développée de la molécule CNH_5 .

21 Grains de sable

Enoncé
p. 326

Lycée Édouard Herriot, Lyon

- 1 Pour connaître le nombre de moles de grains de sable, il faut connaître le nombre de grains de sable et le diviser par le nombre d'Avogadro. Le volume V_d de la dune est donné par la surface d'un triangle d'un côté multipliée par la longueur L de la dune, soit :

$$V_d = L \times \frac{h \times b}{2} = 25 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Quant au volume d'un grain de sable, il vaut :

$$V_g = \frac{4}{3}\pi \times (10^{-4})^3 = 4,2 \times 10^{-12} \text{ m}^3.$$

MÉTHODE

Le diamètre d'un grain de sable étant 0,2 mm, son rayon vaut 0,1 mm soit $0,1 \times 10^{-3} = 10^{-4}$ m. On doit veiller à exprimer le volume de la dune et celui des grains de sable dans la même unité.

Le nombre de grains de sable dans la dune est donc :

$$N = \frac{V_d}{V_g} \approx 6,0 \times 10^{18}$$

et la quantité de matière correspondante est :

$$n = \frac{N}{N_A} = 9,9 \times 10^{-6} \text{ mol} \approx 10^{-5} \text{ mol}.$$

Il n'y a qu'un cent millième de mole de grains de sable dans la dune du Pyla.

- 2 La masse d'un grain de sable est égale à son volume multiplié par sa densité. Nous exprimons le volume en dm^3 , et obtenons ainsi la masse en kilogrammes. Nous avons :

$$V_g = 4,2 \times 10^{-12} \text{ m}^3 = 4,2 \times 10^{-12} \times 10^3 = 4,2 \times 10^{-9} \text{ dm}^3$$

et donc :

$$m_g = V_g \times d \approx 1,1 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

La masse M_g d'une mole est donc $\mathcal{N}_A$ fois plus grande, donc :

$$\begin{aligned} M_g &= \mathcal{N}_A \times m_g \\ &= 6,02 \times 10^{23} \times 1,1 \times 10^{-8} \\ &= 6,6 \times 10^{15} \text{ kg.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La masse molaire de l'entité « grain de sable » est donc de l'ordre de sept mille milliards de tonnes par mole.

22 Solution d'éthanol

➔ **Énoncé**
p. 326

Lycée Victor Duruy, Paris

- 1** On commence par évaluer la masse molaire moléculaire M de l'éthanol. Elle est donnée par :

$$M = 2M(\text{C}) + 6M(\text{H}) + M(\text{O}) = 2 \times 12 + 6 + 16 = 46 \text{ g.mol}^{-1}.$$

La quantité de matière $n = 0,50 \text{ mol}$ d'éthanol correspond donc à une masse :

$$m = n \times M = 0,5 \times 46 = 23 \text{ g}.$$

Si on appelle V le volume recherché, on peut écrire :

$$d = \frac{m}{V}$$

d'où l'on déduit :

$$V = \frac{m}{d} = \frac{23}{0,79} = 29 \text{ cm}^3.$$

La masse étant en gramme, on obtient le volume en mL (ou cm^3). On garde deux chiffres significatifs compte-tenu de la précision de l'énoncé.

- 2** On veut que l'échantillon dont on cherche le volume contienne 29 cm^3 d'éthanol pur, en vertu de la réponse à la question précédente. Il suffit d'effectuer une règle de trois : le volume recherché V' est, en litres ;

$$V' = 1 \times \frac{29}{900} = 0,032 \text{ L} = 32 \text{ cm}^3.$$

23 Quantités de matière

➔ **Énoncé**
p. 327

Institut de la Tour, Paris

- 1** Dans cette partie, il suffit de diviser les masses données par la masse molaire du corps correspondant.

(a) La masse molaire moléculaire de l'eau est $M = 2M(\text{H}) + M(\text{O})$, soit $M = 18 \text{ g.mol}^{-1}$. Dans 36 g d'eau, il y a donc :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{36}{18} = 2,0 \text{ mol}$$

de molécules d'eau.

- (b) La masse molaire du carbone est $M = 12 \text{ g.mol}^{-1}$, donc dans 48 g de carbone, nous avons :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{48}{12} = 4,0 \text{ mol}$$

d'atomes de carbone.

- (c) De la même manière, dans 31 g de plomb nous avons :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{31}{207} = 0,15 \text{ mol}$$

d'atomes de plomb.

- 2** Dans cette partie, il faut évaluer au préalable la masse du corps, en multipliant le volume ($V = 5,0 \text{ cm}^3$) par la densité. Le volume étant en cm^3 , nous obtenons la masse en gramme.

- (a) L'eau a une densité de 1,0, donc la masse d'eau considérée est $m = 5,0 \text{ g}$, et la quantité de matière recherchée est :

$$n = \frac{5,0}{18} = 0,28 \text{ mol.}$$

- (b) La masse d'ammoniac liquide est :

$$m_{\text{NH}_3} = V \times d_{\text{NH}_3} = 3,4 \text{ g.}$$

Par ailleurs la masse molaire moléculaire de l'ammoniac est :

$$M = M(\text{N}) + 3M(\text{H}) = 14 + 3 = 17 \text{ g.mol}^{-1}$$

et la quantité de matière recherchée est donc :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{3,4}{17} = 0,20 \text{ mol.}$$

- (c) De manière similaire on évalue la masse du benzène considéré. Elle vaut :

$$m = d \times v = 0,88 \times 5 = 4,4 \text{ g.}$$

La masse molaire moléculaire du benzène, quant à elle, est

$$M = 6M(\text{C}) + 6M(\text{H}) = 6 \times 12 + 6 = 78 \text{ g.mol}^{-1},$$

et la quantité de matière recherchée est :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{4,4}{78} = 5,6 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

24 Plus léger que l'air

Lycée Marie Curie, Sceaux

Enoncé
p. 327

- 1** (a) Les masses molaires de ces différents gaz sont :

$$M(\text{H}_2) = 2M(\text{H}) = 2,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{CO}_2) = M(\text{C}) + 2M(\text{O}) = 44,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{O}_2) = 2M(\text{O}) = 32,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{N}_2) = 2M(\text{N}) = 28,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M(\text{He}) = 4,0 \text{ g.mol}^{-1}$$

- (b) La densité par rapport à l'eau est la masse (en kilogramme) d'un volume d'un litre. On connaît la masse d'une mole M et le volume occupé par une mole V_M , donc : $\mu = \frac{M}{V_M}$.

On en déduit les différentes densités :

$$\rho_{H_2} = \frac{M(H_2)}{V_M} = 8,4 \times 10^{-5}$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{M(CO_2)}{V_M} = 1,85 \times 10^{-3}$$

$$\rho_{O_2} = \frac{M(O_2)}{V_M} = 1,34 \times 10^{-3}$$

$$\rho_{N_2} = \frac{M(N_2)}{V_M} = 1,18 \times 10^{-3}$$

$$\rho_{He} = \frac{M(He)}{V_M} = 1,7 \times 10^{-4}$$

- 2** Un dirigeable s'élève dans les airs grâce à la poussée de la force d'Archimède de l'air environnant, qui est égale au poids de l'air déplacé. Pour que cette force d'Archimède, dirigée vers le haut, soit supérieure au poids du dirigeable (condition *sine qua non* du décollage), il faut que le gaz remplaçant l'air dans le ballon soit de densité inférieure à celle de l'air (on néglige le poids de l'enveloppe).

En regardant les résultats de la question précédente, on constate que cela est le cas avec le dihydrogène, l'hélium et le diazote.

Toutefois, étant donnée la faible différence entre la densité du diazote et celle de l'air, il est irréaliste de vouloir faire fonctionner un dirigeable avec de l'azote. D'autre part, le dihydrogène est un gaz dangereux, car il réagit violemment au contact du dioxygène de l'air pour donner de l'eau.

En revanche, l'hélium est chimiquement inerte, car c'est un gaz noble.

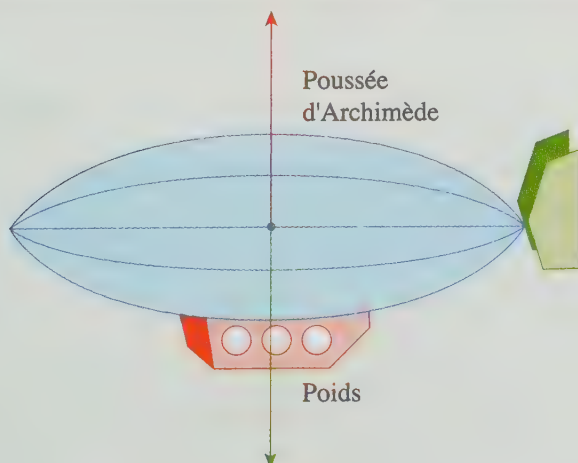


Figure 14.3 – La poussée d'Archimède doit être légèrement supérieure au poids.



Concentration d'une espèce en solution

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Calculer une concentration molaire
4. Concentration massique d'une solution
5. Dilution d'une solution

Thèmes : la santé, la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

Une solution de diiode de concentration $c = 0,100 \text{ mol.L}^{-1}$ a pour volume $v = 100 \text{ mL}$. Quel volume d'eau distillée faut-il lui ajouter pour obtenir une solution de concentration $c' = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$?

Voir corrigé page 344

Ce chapitre introduit la notion de concentration molaire ou massique d'une espèce moléculaire dissoute, et présente des résultats relatifs à la dilution d'une solution.

2 Définitions

Introduisons une petite quantité de sucre (saccharose, de formule brute $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) dans un bécher contenant de l'eau distillée et agitons. Les cristaux de sucre disparaissent : on dit que le sucre est dissous.

Définition 1

L'espèce chimique dissoute est appelée le *soluté*.

Dans l'exemple ci-dessus le sucre est le soluté.

Définition 2

L'espèce dans laquelle le soluté est dissous est appelé le *solvant*.

Dans l'exemple ci-dessus l'eau joue le rôle de solvant. L'ensemble {soluté+solvant} est appelé *solution*. Lorsque le solvant est l'eau, on parle de *solution aqueuse* (du latin *aqua*, eau).

Définition 3

La concentration molaire d'une espèce moléculaire dissoute est la quantité de matière de cette espèce par unité de volume de la solution.

La concentration molaire est le plus fréquemment exprimée en mol.L^{-1} .

Calculer une concentration molaire

Supposons que l'on dissolve 1 mol de diiode I_2 dans un litre d'eau. Alors bien évidemment dans ce cas nous obtenons une mole de diiode dissous par litre d'eau : la concentration de la solution est $c = 1 \text{ mol.L}^{-1}$. On peut également noter la concentration d'une espèce dissoute en mettant le nom de l'espèce entre crochets :

$$[\text{I}_{2\text{aq}}] = 1 \text{ mol.L}^{-1}.$$

Ici l'indice *aq* signifie que l'espèce moléculaire I_2 est en solution aqueuse.

À RETENIR

Si on dissout une quantité de matière n d'une espèce moléculaire et que l'on obtient une solution de volume V , alors la concentration molaire de l'espèce moléculaire dissoute est :

$$c = \frac{n}{V}.$$

Exemples :

- Dans l'exemple précédent la concentration molaire s'obtient simplement par $c = \frac{1}{1} = 1 \text{ mol.L}^{-1}$.
- Supposons que l'on dissolve 0,1 mol de diiode dans 2 L d'eau. Alors la concentration molaire en diiode est $\frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ mol.L}^{-1}$.

Notons que l'on ne peut pas augmenter indéfiniment la concentration d'une solution en y rajoutant du soluté. À partir d'une certaine concentration qui dépend du couple (solvant, soluté), la solution est dite *saturée* et les molécules de soluté qui sont rajoutées après saturation ne sont plus dissoutes.

Les résultats énoncés précédemment ne s'appliquent qu'aux solutions non saturées.

4 Concentration massique d'une solution

La concentration massique d'une solution, à l'instar de la concentration molaire, nous informe sur la quantité de soluté dissout dans une solution. Toutefois, au lieu de représenter une quantité de matière par unité de volume de la solution, elle représente la masse de soluté par unité de volume de la solution.

Elle s'exprime généralement en grammes par litre, de symbole g.L^{-1} .

À RETENIR

Si l'on introduit une masse m d'un soluté dans une solution de volume V , la concentration massique C_m du soluté est donnée par :

$$C_m = \frac{m}{V}.$$

ATTENTION

Il ne faut pas confondre la concentration massique avec la masse volumique, bien qu'elles puissent s'exprimer dans les mêmes unités. La première s'applique seulement au cas d'espèces dissoutes en solution, la seconde s'applique aux composés homogènes, aussi bien liquides que solides ou gazeux.

5 Dilution d'une solution

Si on ajoute du solvant à une solution de concentration c , intuitivement on s'attend à voir baisser sa concentration. En effet, appelons V le volume initial de la solution, et V' le volume final de la solution (ce qui signifie que l'on a rajouté un volume $V' - V$ de solvant).

La quantité de matière en soluté contenue dans la solution ne change pas et vaut :

$$n = c \times V$$

(on a utilisé la formule énoncée à la section précédente).

Puisque n ne change pas, on a aussi l'égalité :

$$n = c' \times V'$$

où c' est la concentration finale (après dilution), que l'on recherche. Nous avons donc :

$$c' = \frac{n}{V'} = \frac{c \times V}{V'},$$

soit :

$$c' = c \times \frac{V}{V'}.$$

On retrouve bien ce à quoi l'on s'attendait : la concentration finale est inférieure à la concentration initiale puisque l'on doit multiplier celle-ci par un nombre inférieur à un ($V < V'$ donc $\frac{V}{V'} < 1$).

Définition 4

On appelle facteur de dilution le quotient $\frac{V'}{V}$, qui est aussi égal à $\frac{c}{c'}$.

Exemple : si le facteur de dilution vaut 4, la solution a été diluée 4 fois. La concentration de la solution finale est 4 fois moins élevée que celle de la solution initiale.

Solution de l'exercice type

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

Nous pouvons adopter deux démarches pour résoudre cet exercice : soit une rédaction détaillée qui reprend en substance la démarche explicitée à la section précédente, soit appliquer directement la formule que nous venons d'obtenir relative à la dilution. Nous choisissons ici la première démarche.

Il nous faut tout d'abord savoir quelle est la quantité de matière n en diode dans la solution initiale. Elle est donnée par :

$$n = c \times v = 0,100 \times 0,100 = 1,00 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

(on veillera à bien exprimer le volume en litres et non en millilitres). Cette quantité de matière est conservée lors de la dilution puisqu'on ne change pas la quantité de soluté.

On veut obtenir une concentration $c' = 2,00 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$, donc cette solution doit avoir un volume V' donné par :

$$V' = \frac{n}{c'} = \frac{1,00 \times 10^{-2}}{2,00 \times 10^{-2}} = 0,500 \text{ L} = 500 \text{ mL.}$$

Le volume d'eau distillée à ajouter V_e est donc donné par la différence entre le volume final et le volume initial :

$$V_e = V' - V = 500 - 100 = 400 \text{ mL.}$$

Voir énoncé page 341

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 351

- 1 On dispose d'une solution aqueuse de concentration molaire c . On ajoute de l'eau distillée jusqu'à doubler le volume de la solution. Sa nouvelle concentration est :
- a** c **b** $\frac{c}{2}$ **c** $2c$ **d** $4c$
- 2 On considère une solution saturée en saccharose. Sa concentration molaire en saccharose
- a** peut augmenter si on rajoute de l'eau
b peut augmenter si on rajoute du saccharose
c ne peut pas augmenter
- 3 On mélange entre elles deux solutions d'une même espèce moléculaire, initialement de concentrations égales. La concentration de la solution obtenue :
- a** reste la même
b est inférieure à la concentration commune initiale
c est supérieure à la concentration commune initiale

2 **Solution de saccharose**

★

10 min

Corrigé
p. 351

Lycée Galilée, Vienne

On dissout 5 g de sucre (saccharose, de formule brute $C_{12}H_{22}O_{11}$) dans une tasse à café contenant un volume de 50 mL d'eau pure. Quelle est la concentration en saccharose de la solution obtenue ?

Données :

- Masse molaire atomique du carbone : $M(C) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$.
- Masse molaire atomique de l'hydrogène : $M(H) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$.
- Masse molaire atomique de l'oxygène : $M(O) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$.

3 **Solution de diiode**

★★

10 min

Corrigé
p. 351

Lycée Sainte-Anne, Brest

On mélange une solution de diiode de concentration $C = 0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ et de volume $V = 100 \text{ mL}$ et une solution de diiode de concentration $C' = 0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ et de volume $V' = 500 \text{ mL}$.
 Quelle est la concentration de la solution obtenue ?

Paracétamol

★★

10 min

Corrigé
p. 352

Lycée Paul Langevin, Suresnes

On introduit le contenu d'un sachet de masse $m = 500 \text{ mg}$ de paracétamol dans un verre contenant $V = 150 \text{ mL}$ d'eau.

- 1 Quelle est la concentration massique C_m de la solution aqueuse de paracétamol obtenue après agitation ? On suppose que le mélange se fait sans variation de volume.
- 2 Quelle est la concentration molaire correspondante ?
- 3 S'agit-il d'une dilution ou d'une dissolution ?

Données : • $M(C) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$. • $M(O) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$.
 • $M(H) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$. • $M(N) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$.
 • Formule brute du paracétamol : $C_8H_9NO_2$.

5 Solution de glucose



10 min

Corrigé
p. 352

Lycée du Parc, Lyon

On dispose de 150 mL d'une solution de glucose $C_6H_{12}O_6$ de concentration molaire $c = 2,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$.

- 1 Quelle masse de glucose a-t-il fallu dissoudre pour fabriquer cette solution ?
- 2 On ajoute 350 mL d'eau pure à cette solution. Quelle est la nouvelle concentration molaire du soluté ?

Données : • Masse molaire atomique de l'hydrogène : $M(H) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$.
 • Masse molaire atomique de l'oxygène : $M(O) = 16,0 \text{ g.mol}^{-1}$.
 • Masse molaire atomique de le carbone : $M(C) = 12,0 \text{ g.mol}^{-1}$.

6 Dilution d'une solution



5 min

Corrigé
p. 352

Lycée Pierre Corneille, Rouen

On dispose de 50 mL d'une solution de sulfate de cuivre de concentration $0,20 \text{ mol.L}^{-1}$. Quel volume d'eau faut-il lui ajouter pour obtenir une solution de sulfate de cuivre de concentration $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$?

7 Dilution d'une solution de diiode



10 min

Corrigé
p. 353

Lycée Beth Hanna, Paris

On introduit une masse $m = 1,00 \text{ g}$ de cristaux de diiode I_2 dans un bécher contenant 100 mL d'eau distillée.

- 1 Quelle est la concentration de la solution obtenue ?
- 2 À 400 mL d'eau distillée, on ajoute la moitié de la solution de la question précédente. Quelle est la concentration de la solution obtenue ?

Données : • Masse molaire atomique de l'iode : $M(I) = 127 \text{ g.mol}^{-1}$.

8 **Élaboration d'une solution**

★★★

25 min

Corrigé
p. 353**Lycée Clémenceau, Nantes**

On dissout une masse $m = 31,0$ g de cristaux de diiode hydratés dans 1,00 L d'eau distillée. On obtient une solution de concentration $1,00 \times 10^{-1} \text{ mol.L}^{-1}$. Les cristaux sont hydratés car chaque molécule de diiode est entourée d'un certain nombre n de molécules d'eau H_2O : le corps dissous a pour formule brute $\text{I}_2, n(\text{H}_2\text{O})$.

- 1 Déterminer la quantité de matière en diiode hydraté que l'on a introduit dans la solution.
- 2 En déduire la masse molaire du diiode hydraté.
- 3 Déterminer la valeur de n .

Données : • $M(\text{I}) = 127$ • $M(\text{H}) = 1$ • $M(\text{O}) = 16$

9 **Mélange de deux solutions**

★★★

15 min

Corrigé
p. 354**Lycée Charles Péguy, Gorges**

On considère un volume V_1 d'une solution aqueuse d'une espèce moléculaire X de concentration C_1 , et un volume V_2 d'une solution aqueuse de l'espèce moléculaire X de concentration C_2 ($C_2 > C_1$). On mélange entre elles les deux solutions.

- 1 Montrer que la concentration C de la solution obtenue est comprise entre C_1 et C_2 (on admettra que le volume V du mélange est donné par $V = V_1 + V_2$).
- 2 En déduire que si on mélange deux solutions de diiode de teintes différentes, alors la solution obtenue a une teinte intermédiaire entre les deux teintes de départ (c'est-à-dire qu'elle ne peut pas être plus claire que la solution initiale la plus claire, ni plus foncée que la solution initiale la plus foncée).

10 **Préparation d'une solution**

★★★

10 min

Corrigé
p. 355**Lycée Jules-Ferry, Paris**

On désire préparer $V = 100$ mL d'une solution de sulfate de cuivre de concentration $c = 0,100 \text{ mol.L}^{-1}$.

- 1 Quelle masse de sulfate de cuivre pentahydraté $\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$ doit-on peser ?
- 2 Quelle serait la masse de sulfate de cuivre anhydre qu'il faudrait peser pour réaliser la même solution ?

Données : • $M(\text{Cu}) = 63,5 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g.mol}^{-1}$
• $M(\text{S}) = 32,1 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{H}) = 1,0 \text{ g.mol}^{-1}$

11 Chlorure de fer III

★★★

10 min

Corrigé
p. 356

Lycée Henri IV, Paris

Une masse $m = 8,125$ grammes de chlorure de fer III FeCl_3 a été dissoute dans de l'eau afin d'obtenir 500 mL de solution. Calculer la concentration molaire en ions Cl^- de cette solution.

Données : • $M(\text{Fe}) = 56,0 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$

12 Perfusion de glucose

★★★

20 min

Corrigé
p. 356

Lycée du Parc, Lyon

Une perfusion de glucose permet d'apporter de l'eau (réhydratation) et des médicaments à un patient. Il existe plusieurs solutions dans le commerce, étiquetées entre 2,5 % et 50 % de glucose. Une indication de X % signifie que 100 mL de solution contiennent X grammes de glucose.

- 1 Quelle est la concentration massique d'une solution de glucose à 5 % ?
- 2 Quelle quantité de matière en glucose contiennent 10 mL de la solution précédente ?
- 3 Quelle masse de glucose doit-on mesurer pour préparer, par dissolution dans de l'eau pure, 50 mL de solution de glucose à 50 % ?

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$ • Formule brute du glucose : $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$

13 Dissolution, dilution et homéopathie

★★★

20 min

Corrigé
p. 357

Lycée Corneille, La Celle Saint-Cloud

On s'intéresse dans cet exercice à la dissolution et à la dilution de l'aspirine.

- 1 L'aspirine a pour formule brute $\text{C}_9\text{H}_8\text{O}_4$.
 - (a) Calculer la masse molaire moléculaire de l'aspirine M_{aspirine} .
 - (b) Calculer la quantité de matière d'aspirine dans un comprimé contenant $m = 500$ mg d'aspirine.
- 2 On dissout ce comprimé dans 100 mL d'eau. On obtient une solution (S). On dilue dix fois cette solution (S) (facteur de dilution 10) pour obtenir 100 mL d'une solution diluée (D).
 - (a) Donner le protocole de la *dissolution* du comprimé au laboratoire en nommant la verrerie. Préciser le volume de la verrerie si nécessaire.
 - (b) Donner le protocole de la *dilution* au laboratoire en nommant la verrerie. Préciser les volumes de chaque instrument utilisé.
 - (c) Calculer la concentration *massique* d'aspirine dans la solution (S).
 - (d) Calculer la concentration *molaire* dans la solution (D).

3 Une solution homéopathique d'aspirine à 15CH notée (H) est supposée avoir une concentration $10^{-30} \text{ mol.L}^{-1}$.

(a) Dans quel volume V_{eau} faudrait-il diluer $V' = 1 \text{ mL}$ de la solution (D) pour obtenir la solution (S) ?

(b) Déterminer la quantité de matière puis le nombre de molécules d'aspirine dans 1 L de solution homéopathique à 15CH. Interpréter le résultat : peut-on diluer indéfiniment une solution ?

Données : • $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$

• $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$

• $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$

• $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

14 Boisson isotonique

★★★

15 min

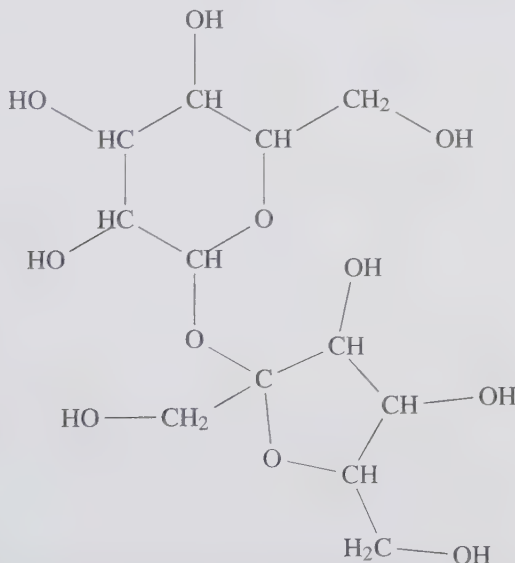
Corrigé
p. 358

Lycée Étienne Mimard, Saint-Étienne

Une boisson isotonique est une boisson qui a la même concentration en glucides et en ions sodium que le sang. Ceci favorise son assimilation intestinale, garantit une meilleure digestion, et aide à maintenir l'hydratation de l'organisme durant un effort.

Pour préparer une boisson isotonique avec du saccharose, il faut que celui-ci ait une concentration $C_m = 60 \text{ g.L}^{-1}$.

On représente ci-dessous la formule développée du saccharose.



1 Quelle masse de saccharose pur faut-il introduire dans 750 mL d'eau pour fabriquer une boisson isotonique ?

2 Quelle quantité de matière cela représente-t-il ?

Données : • $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$

• $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$

• $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$

15 Café normal et décaféiné

20 min

Corrigé
p. 359**Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois**

La concentration massique en caféine d'un café normal est voisine de $C_m = 2,0 \text{ g.L}^{-1}$.

Celle d'un café décaféiné est voisine de $C_d = 3,0 \times 10^{-4} \text{ mol.L}^{-1}$.

- 1 Quelle est la concentration molaire C en caféine d'un café normal ?
- 2 Déterminer la masse de caféine apportée par une tasse de café normal et celle apportée par une tasse de café décaféiné. On admettra qu'une tasse contient $V = 25 \text{ mL}$ de café.

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- La formule brute de la caféine est $\text{C}_8\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_2$.

16 Analyse de sang

20 min

Corrigé
p. 359**Lycée Fénélon, Paris**

On considère l'analyse de sang dont un extrait est donné ci-dessous :

Bilan lipidique

cholestérol $1,91 \text{ g.L}^{-1}$

- 1 Quelle est la masse totale de cholestérol dans le sang de la personne analysée, sachant que celle-ci a un volume de sang total $V = 5,2 \text{ L}$.
- 2 Quelle est la concentration molaire du cholestérol dans le sang de cette personne ?
- 3 Combien y a-t-il au total de molécules de cholestérol dans son sang ?

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Formule brute du cholestérol : $\text{C}_{27}\text{H}_{46}\text{O}$

17 Boisson light

20 min

Corrigé
p. 360**Lycée Carnot, Cannes**

Une canette de 33 mL d'une boisson *light* contient 80 mg d'aspartame, un édulcorant artificiel.

- 1 Déterminer la concentration massique de l'aspartame dans cette boisson.
- 2 En déduire la concentration molaire de ce dernier.
- 3 Combien y a-t-il de molécules d'aspartame dans la canette ?

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$
- Formule brute de l'aspartame : $\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_5$.
- Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

1 **QCM** Testez vos connaissances➔ **Énoncé**
p. 345

- 1 **b**. On pourra s'en convaincre en appliquant la formule vue en cours.
- 2 **c**. La solution est saturée, donc sa concentration en saccharose est maximale et ne peut pas augmenter.
- 3 **a**. Si on appelle V_1 et V_2 les volumes des solutions initiales, et c leur concentration molaire, la concentration du mélange est donnée par :

$$c' = \frac{cV_1 + cV_2}{V_1 + V_2} = c \frac{V_1 + V_2}{V_1 + V_2} = c.$$

2 **Solution de saccharose**➔ **Énoncé**
p. 345**Lycée Galilée, Vienne**

On demande une concentration. On connaît le volume, il nous faut donc déterminer la quantité de matière dissoute. C'est possible, puisque l'on connaît la masse dissoute, et que les données de l'énoncé permettent d'évaluer la masse molaire du saccharose. Celle-ci est donnée par :

$$\begin{aligned} M &= 12M(C) + 22M(H) + 11M(O) \\ &= 12 \times 12 + 22 \times 1 + 11 \times 16 \\ &= 342 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La quantité de matière dissoute est donc :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{5}{342} \approx 0,015 \text{ mol.}$$

Pour obtenir la concentration, n'oublions pas de convertir au préalable le volume en litres : $V = 50 \text{ mL} = 0,05 \text{ L}$. La concentration en saccharose dans la tasse à café vaut donc :

$$c = \frac{n}{V} = \frac{0,015}{0,05} = 0,3 \text{ mol.L}^{-1}.$$

3 **Solution de diiode**➔ **Énoncé**
p. 345**Lycée Sainte-Anne, Brest**

La quantité de matière en diiode dans la première solution est donnée par :

$$n = C \times V = 0,5 \times 0,1 = 0,05 \text{ mol.}$$

On notera qu'il ne faut pas oublier de convertir les millilitres (mL) en litres (L) avant d'effectuer l'application numérique. De la même manière, la quantité de matière en diiode dans la seconde solution est :

$$n' = C' \times V' = 0,1 \times 0,5 = 0,05 \text{ mol.}$$

Dans le mélange, la quantité de matière totale en diiode est donc : $n_t = n + n'$, soit $n_t = 0,1 \text{ mol}$. En outre, le volume du mélange est $V_t = V + V'$.

La concentration du diiode est donc :

$$[I_2] = \frac{n_t}{V_t} = \frac{0,1}{0,1 + 0,5} \approx 0,17 \text{ mol.L}^{-1}.$$

4 Paracétamol

➔ Enoncé
p. 345

Lycée Paul Langevin, Suresnes

- 1 La concentration massique est donnée par :

$$C_m = \frac{m}{V} = \frac{500}{150} = 3,3 \text{ mg.mL}^{-1} = 3,3 \text{ g.L}^{-1}.$$

- 2 On commence par évaluer la masse molaire M du paracétamol. Elle vaut :

$$M = 8M(C) + 9M(H) + M(N) + 2M(O) = 8 \times 12 + 9 + 14 + 16 \times 2 = 151 \text{ g.mol}^{-1}$$

On en déduit la concentration molaire en paracétamol :

$$c = \frac{C_m}{M} = \frac{3,3}{151} = 2,2 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}.$$

- 3 Il s'agit d'une dissolution.

5 Solution de glucose

➔ Enoncé
p. 346

Lycée du Parc, Lyon

- 1 Soit n la quantité de matière du glucose présent dans la solution. Le volume de celle-ci est $V = 150 \text{ mL}$. Celle-ci vaut :

$$n = c \times V = 2,0 \times 10^{-2} \times 150 \times 10^{-3} = 3,0 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

La masse molaire moléculaire du glucose est donnée par :

$$\begin{aligned} M &= 6M(C) + 12M(H) + 6M(O) \\ &= 6 \times 12,0 + 12 \times 1,0 + 6 \times 16,0 = 180 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La masse m de glucose dissoute dans la solution est donc :

$$m = M \times n = 180 \times 3,0 \times 10^{-3} = 0,54 \text{ g.}$$

- 2 Le nouveau volume de la solution est $V' = 150 + 350 = 500 \text{ mL}$. La concentration c' du glucose y est donc :

$$c' = \frac{n}{V'} = \frac{3,0 \times 10^{-3}}{0,500} = 6,0 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}.$$

6 Dilution d'une solution

➔ Enoncé
p. 346

Lycée Pierre Corneille, Rouen

Commençons par calculer la quantité de matière en sulfate de cuivre que l'on a dans la solution de départ. Elle est donnée par :

$$n = c \times V$$

soit, en effectuant l'application numérique :

$$n = 0,20 \times 50 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

On a un centième de mole de sulfate de cuivre initialement.

Pour obtenir une solution de concentration $c' = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$, il faut donc un volume total de solution qui soit :

$$V_t = \frac{n}{c'} = \frac{1,0 \times 10^{-2}}{1,0 \times 10^{-2}} = 1,0 \text{ L.}$$

Il faut donc ajouter 950 mL d'eau aux 50 mL de solution initiale pour obtenir la solution désirée.

Dilution d'une solution de diiode

Enoncé
p. 346

Lycée Beth Hanna, Paris

- 1** Commençons par calculer la quantité de matière n de diiode introduit dans la solution.

On a :

$$n = \frac{m}{M},$$

où $m = 1 \text{ g}$ est la masse introduite et $M = 2M(\text{I}) = 254 \text{ g.mol}^{-1}$ est la masse molaire du diiode. On en déduit :

$$n = \frac{1,00}{254} = 3,94 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

La concentration de la solution obtenue est obtenue en divisant la quantité de matière par le volume $V = 100 \text{ mL} = 0,1 \text{ L}$ de la solution. On obtient :

$$c = \frac{n}{V} = 3,94 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}.$$

- 2** La quantité de matière en diiode présente dans cette nouvelle solution est $n' = \frac{n}{2} = 1,97 \times 10^{-3} \text{ mol}$, et le volume est $V' = 400 + \frac{100}{2}$, soit $V' = 450 \text{ mL} = 0,45 \text{ L}$, donc la nouvelle concentration est :

$$c' = \frac{n'}{V'} = \frac{1,97 \times 10^{-3}}{0,45} = 4,4 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}.$$

Élaboration d'une solution

Enoncé
p. 347

Lycée Clémenceau, Nantes

- 1** La quantité de matière en diiode hydraté introduite est :

$$n = c \times V = 1,00 \times 10^{-1} \times 1,00 = 0,1 \text{ mol.}$$

- 2** La masse introduite est $m = 31 \text{ g}$ donc la masse molaire du corps dissous est :

$$M = \frac{m}{n} = \frac{31,0}{1,00 \times 10^{-1}} = 310 \text{ g.mol}^{-1}.$$

- 3 D'un autre côté, cette masse molaire peut s'écrire :

$$M = 2M(I) + 2nM(H) + nM(O) = 254 + 18n$$

On a donc :

$$254 + 18n = 310 \quad \text{soit : } n = \frac{310 - 254}{18} = 3,1.$$

On a déduit que $n = 3$: chaque molécule de diiode est entourée de trois molécules d'eau.



Mélange de deux solutions

Enoncé
p. 347

Lycée Charles Péguy, Gorges

- 1 La quantité de matière en X présente dans la solution 1 est donnée par :

$$n_1 = C_1 \times V_1.$$

De même, la quantité de matière présente dans la solution 2 est donnée par :

$$n_2 = C_2 \times V_2.$$

La quantité de matière dans le mélange est donc : $n = n_1 + n_2$. Puisque le volume du mélange est $V = V_1 + V_2$, on en déduit :

$$C = \frac{n}{V} = \frac{C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2}{V_1 + V_2}.$$

Montrons dans un premier temps que cette concentration est supérieure à C_1 . Pour cela, on évalue $C - C_1$ et on montre que cette grandeur est positive. On a :

$$C - C_1 = \frac{C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2}{V_1 + V_2} - C_1.$$

En réduisant au même dénominateur, on obtient :

$$C - C_1 = \frac{C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2}{V_1 + V_2} - \frac{C_1 \times (V_1 + V_2)}{V_1 + V_2} = \frac{(C_2 - C_1) \times V_2}{V_1 + V_2}.$$

Or la quantité $C_2 - C_1$ est positive, puisque par hypothèse, on a : $C_2 > C_1$ (voir l'énoncé). Donc $C - C_1 > 0$ et donc $C > C_1$.

Montrons à présent que $C < C_2$. Les calculs à effectuer sont du même genre que précédemment. On a :

$$C - C_2 = \frac{C_1 \times V_1 + C_2 \times V_2}{V_1 + V_2} - \frac{C_2 \times (V_1 + V_2)}{V_1 + V_2} = \frac{(C_1 - C_2) \times V_1}{V_1 + V_2}.$$

Or $C_1 - C_2 < 0$ donc $C - C_2 < 0$, c'est-à-dire que : $C < C_2$.

On a donc en définitive le résultat :

$$C_1 < C < C_2.$$

- 2** La teinte d'une solution de diode dépend de sa concentration. Une solution peu concentrée est claire, une solution très concentrée est foncée. Si deux solutions ont des teintes différentes, alors elles ont des concentrations différentes. Leur mélange, d'après la question précédente, a une concentration intermédiaire entre les concentrations de départ. La teinte est donc elle aussi intermédiaire :

- Plus foncée que la plus claire des deux solutions de départ : $C > C_1$;
- Plus claire que la plus foncée des deux solutions de départ : $C < C_2$.

10 Préparation d'une solution

 **Énoncé**
p. 347

Lycée Jules-Ferry, Paris

- 1** Calculons la quantité de matière n en sulfate cuivre que l'on doit introduire. Elle est donnée par :

$$n = c \times V.$$

Application numérique :

$$n = 100 \times 10^{-3} \times 0,100 = 1,00 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Calculons à présent la masse molaire M du sulfate de cuivre pentahydraté :

$$\begin{aligned} M &= M(\text{Cu}) + M(\text{S}) + 9M(\text{O}) + 10M(\text{H}) \\ &= 63,5 + 32,1 + 9 \times 16,0 + 10 \times 1,0 = 249,6 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La masse m de sulfate de cuivre pentahydraté qu'il faut introduire est donc :

$$m = M \times n = 249,6 \times 1,00 \times 10^{-2} = 2,496 \text{ g} \approx 2,50 \text{ g.}$$

- 2** Le sulfate de cuivre anhydre a pour formule brute CuSO_4 . Sa masse molaire est donc :

$$\begin{aligned} M' &= M(\text{Cu}) + M(\text{S}) + 4M(\text{O}) \\ &= 63,5 + 32,1 + 4 \times 16,0 = 159,6 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La masse m' de sulfate de cuivre anhydre à peser pour obtenir une solution de même concentration par conséquent :

$$m' = M' \times n = 159,6 \times 1,00 \times 10^{-2} = 1,596 \text{ g} \approx 1,60 \text{ g.}$$

Nous avons donné ces résultats avec trois chiffres significatifs. C'est un maximum compte-tenu de la précision des données de l'énoncé. Toutefois comme l'obtention de la solution fait intervenir plusieurs sources d'erreurs potentielles (erreur de mesure de la pesée, erreur du volume d'eau ajouté, etc.) il est préférable de ne pas introduire d'erreur supplémentaire en arrondissant à un nombre de chiffres significatifs trop bas la valeur de la masse à peser.

11 Chlorure de fer III

Enoncé
p. 348

Lycée Henri IV, Paris

La masse molaire du chlorure de fer III est :

$$M = 56,0 + 3 \times 35,5 = 162,5 \text{ g.mol}^{-1}$$

et donc la masse introduite représente une quantité de matière :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{8,125}{162,5} = 5,00 \times 10^{-2} \text{ mol.}$$

Ces n moles vont donner $3 \times n$ moles d'ions Cl^- . Puisque ces $3 \times n$ moles se trouvent dans un volume $v = 0,500 \text{ L}$ de solution, la concentration en ions Cl^- est finalement :

$$[\text{Cl}^-] = \frac{3 \times n}{v} = \frac{0,150}{0,500} = 0,300 \text{ mol.L}^{-1}.$$

Compte-tenu de la précision des indications données dans l'énoncé, nous gardons ici trois chiffres significatifs.

12 Perfusion de glucose

Enoncé
p. 348

Lycée du Parc, Lyon

- 1 Une solution de glucose à 5 % contient 5 g de glucose pour 100 mL, donc 1 000 mL (soit 1 L) de la solution contiennent 50 g de glucose. La concentration massique d'une solution de glucose à 5 % est $C_m = 50 \text{ g.L}^{-1}$.

- 2 Nous calculons au préalable la masse molaire M du glucose. Elle vaut :

$$M = 6M(\text{C}) + 12M(\text{H}) + 6M(\text{O}) = 180 \text{ g.mol}^{-1}.$$

Un volume $V = 10 \text{ mL}$ de la solution précédente contient donc la quantité de matière n en glucose donnée par :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{V \times C_m}{M}.$$

où le numérateur représente la masse de glucose contenu dans la solution. L'application numérique donne (on veille à convertir le volume en litre) :

$$n = \frac{0,01 \times 50}{180} = 2,8 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- 3 Un litre de cette solution contient 500 g de glucose, donc un volume $v' = 50 \text{ mL}$ ($v' = 0,05 \text{ L}$) contient une masse m' de glucose donnée par :

$$m' = V' \times C'_m = 0,05 \times 500 = 25,0 \text{ g.}$$

Il faut donc mesurer 25,0 g de glucose pour obtenir la solution demandée.

13

Dissolution, dilution et homéopathie

Enoncé
p. 348

Lycée Corneille, La Celle Saint-Cloud

- 1 (a) La masse molaire moléculaire de l'aspirine est :

$$M_{\text{aspirine}} = 9M(\text{C}) + 8M(\text{H}) + 4M(\text{O}) = 9 \times 12 + 8 \times 1 + 4 \times 16 = 180 \text{ g.mol}^{-1}.$$

- (b) La quantité de matière recherchée est :

$$n = \frac{m}{M_{\text{aspirine}}} = \frac{0,5}{180} = 2,8 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

- 2 (a) Pour dissoudre le comprimé dans 100 mL d'eau, on utilise une fiole jaugée de 100 mL. On y introduit le comprimé et on ajoute de l'eau distillée environ jusqu'aux deux tiers du volume souhaité. On agite, puis on complète en ajoutant de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. On termine en homogénéisant la solution.

- (b) Pour diluer dix fois la solution (S), on utilise une pipette jaugée de 10,0 mL pour prélever 10,0 mL de la solution (S), que l'on introduit dans une fiole jaugée de 100 mL. On complète avec de l'eau distillée jusqu'aux deux-tiers du trait de jauge, environ, et l'on agite la solution. Enfin, on complète jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

- (c) La concentration massique de la solution (S) est donnée par :

$$C_m = \frac{m}{V} = \frac{0,5}{0,1} = 5,00 \text{ g.L}^{-1}.$$

- (d) La concentration massique de la solution (D) est par conséquent

$$C'_m = \frac{C_m}{10} = 0,500 \text{ g.L}^{-1}.$$

On en déduit la concentration molaire c' par :

$$c' = \frac{C'_m}{M_{\text{aspirine}}} = \frac{0,500}{180} = 2,78 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}.$$

- 3 (a) Calculons le facteur de dilution souhaité. La solution (D) a pour concentration $c' = 2,78 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$, et la solution homéopathique a pour concentration $c'' = 10^{-30} \text{ mol.L}^{-1}$. Le facteur de dilution est :

$$f = \frac{c'}{c''} = 2,78 \times 10^{27}.$$

On a donc $V_{\text{eau}} = V'' - V' = fV' - V' = 2,78 \times 10^{27} \text{ mL}$.

Convertissons ce volume très important en mètres cube. On a

$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ dm}^3 = 10^3 \text{ L} = 10^6 \text{ mL}$$

donc :

$$v' = 2,78 \times 10^{21} \text{ m}^3.$$

Il est bien entendu exclu de procéder à une telle dilution en une seule fois. Il faudrait procéder par dilutions successives, jusqu'à atteindre la concentration désirée.

- (b) Puisque la concentration de la solution est $10^{-30} \text{ mol.L}^{-1}$, un litre de solution homéopathique à 15CH contient 10^{-30} mol de molécules d'aspirine.

Le nombre n de molécules correspondant est obtenu en multipliant cette quantité de matière par le nombre d'Avogadro :

$$N = n \times \mathcal{N}_A = 10^{-30} \times 6,02 \times 10^{23} = 6,02 \times 10^{-7} \text{ molécules.}$$

$$f = \frac{c'}{c''} = \frac{V''}{V'}$$

soit :

$$V'' = fV' = V' + V_{\text{eau}}.$$

Ce nombre est très inférieur à un, alors que le nombre de molécules contenu dans la solution doit bien entendu être un entier. Il est donc hautement probable que la solution ne contienne plus une seule molécule d'aspirine. On ne peut pas diluer indéfiniment une solution.

14 Boisson isotonique

Enoncé
p. 349

Lycée Étienne Mimard, Saint-Étienne

- 1 La masse de saccharose est donnée par :

$$m = C_m \times V = 60 \times 0,750 = 45 \text{ g.}$$

- 2 Pour répondre à cette question, il faut au préalable évaluer la masse molaire moléculaire du saccharose. Une étude attentive de la formule semi-développée nous indique que la formule brute du saccharose est $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$.

Sa masse molaire moléculaire est donc :

$$M = 12M(\text{C}) + 22M(\text{H}) + 11M(\text{O}) = 342 \text{ g.mol}^{-1}.$$

La quantité de matière à introduire dans la solution est donc :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{45}{342} = 0,13 \text{ mol.}$$

15 Café normal et décaféiné

→ Enoncé
p. 350

Lycée Pablo Picasso, Fontenay sous Bois

- 1 On commence par évaluer la masse molaire moléculaire M de la caféine :

$$M = 8M(\text{C}) + 10M(\text{H}) + 4M(\text{N}) + 2M(\text{O}) = 194 \text{ g.mol}^{-1}.$$

La concentration molaire C en caféine d'un café normal est donc :

$$C = \frac{C_m}{M} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}.$$

- 2 La masse de caféine apportée par un café normal est :

$$m = C_m \times V = 2,0 \times 25 \times 10^{-3} = 0,05 \text{ g} = 50 \text{ mg}.$$

La masse de caféine apportée par un café décaféiné est :

$$m_d = C_d \times M \times V = 3,0 \times 10^{-4} \times 194 \times 25 \times 10^{-3} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ g} = 1,5 \text{ mg}.$$

16 Analyse de sang

→ Enoncé
p. 350

Lycée Fénéton, Paris

- 1 La masse totale m de cholestérol est donnée par :

$$m = V \times C_m,$$

où $C_m = 1,91 \text{ g.L}^{-1}$ est la concentration massique du cholestérol.

L'application numérique donne :

$$m = 1,91 \times 5,2 = 9,9 \text{ g}.$$

On garde ici deux chiffres significatifs compte-tenu de la précision avec laquelle est donné le volume.

- 2 On évalue la masse molaire moléculaire du cholestérol.

On obtient :

$$M = 27M(\text{C}) + 46M(\text{H}) + M(\text{O}) = 27 \times 12 + 46 + 16 = 386 \text{ g.mol}^{-1}.$$

La concentration molaire s'en déduit par :

$$c = \frac{C_m}{M} = \frac{1,91}{386} = 4,95 \times 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}.$$

- 3 La quantité de matière n en cholestérol dans le sang est donnée par :

$$n = \frac{m}{M}.$$

Le nombre de molécules N s'en déduit par :

$$N = \mathcal{N}_A \times n = \mathcal{N}_A \frac{m}{M} = 6,02 \times 10^{23} \times \frac{9,9}{386} = 1,5 \times 10^{22} \text{ molécules}.$$

17 Boisson light

➔ Enoncé
p. 350

Lycée Carnot, Cannes

- 1 La concentration massique C_m s'obtient en divisant la masse $m = 80$ mg par le volume $V = 33$ mL :

$$C_m = \frac{m}{V} = \frac{80 \times 10^{-3}}{33 \times 10^{-3}} = 2,4 \text{ g.L}^{-1}.$$

- 2 Pour estimer la concentration molaire, on commence par évaluer la masse molaire moléculaire M de l'aspartame. Elle vaut :

$$\begin{aligned} M &= 14M(\text{C}) + 18M(\text{H}) + 2M(\text{N}) + 5M(\text{O}) \\ &= 14 \times 12 + 18 + 2 \times 14 + 5 \times 16 = 294 \text{ g.mol}^{-1}. \end{aligned}$$

La concentration molaire c s'obtient alors par :

$$c = \frac{C_m}{M} = \frac{2,4}{294} = 8,2 \times 10^{-3} \text{ g.mol}^{-1}.$$

- 3 La quantité de matière en aspartame contenue dans la canette est :

$$n = \frac{m}{M}.$$

Le nombre N de molécules s'en déduit en multipliant cette quantité par le nombre d'Avogadro :

$$N = N_A \frac{m}{M} = 6,02 \times 10^{23} \times \frac{80 \times 10^{-3}}{294} = 1,6 \times 10^{20} \text{ molécules}.$$

Les réactions chimiques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Représentation d'une transformation chimique
4. Lois de conservation au cours d'une transformation chimique

Thèmes : la santé, la pratique du sport

1 Introduction

Exercice type

Lycée Pierre Corneille, Rouen

Équilibrer l'équation-bilan suivante :



Voir corrigé page 365

Cet exercice fait appel aux notions de systèmes et transformations chimiques, que l'on modélise par des réactions chimiques. Savoir équilibrer une réaction chimique est primordial pour pouvoir effectuer un bilan de matière après transformation chimique.

2 Définitions

Définition 1

On appelle système chimique une région définie de l'espace contenant une ou plusieurs espèces chimiques.

Exemple : le contenu d'un bécher contenant une solution aqueuse est un système chimique.

Pour spécifier un système chimique, il faut dresser l'inventaire des espèces chimiques qu'il contient en spécifiant la quantité de chacun d'entre elles ainsi que leur état (solide, gazeux, en solution aqueuse, etc.), et l'état physique du système (sa température et sa pression).

Définition 2

Une transformation chimique correspond à l'évolution d'un système chimique vers un système chimique différent.

L'état du système chimique avant la transformation est appelé *état initial*. L'état du système chimique après la transformation est appelé *état final*.

Exemple : considérons le système chimique contenu dans tube à essai renfermant sous forme gazeuse deux tiers de dihydrogène et un tiers de dioxygène, à la température de 20 °C et à pression atmosphérique standard. Si nous approchons une allumette, une explosion se produit dans le tube à essai et de l'eau apparaît sur sa paroi. Nous sommes en présence d'un nouveau système chimique : de l'eau liquide à l'intérieur d'un tube à essai, à pression atmosphérique standard et à la température de 20 °C (initialement la température de l'eau est plus importante, mais elle redevient égale à la température du laboratoire une fois l'équilibre thermique atteint).

Température $T = 20\text{ °C}$
Pression $P = 101\,325\text{ Pa}$
 5 cm^3 de O_2 (état gazeux)
 10 cm^3 de H_2 (état gazeux)

Température $T = 20\text{ °C}$
Pression $P = 101\,325\text{ Pa}$
 H_2O (eau, sous forme liquide)

Le contenu du tube à essai a été le siège d'une transformation chimique. Les liaisons entre les atomes d'oxygène d'une part, et entre les atomes d'hydrogène d'autre part se sont cassées, et de nouvelles liaisons sont apparues, de manière à former des molécules d'eau.

À RETENIR

Au cours d'une transformation chimique les liaisons entre atomes ou ions sont modifiées, de manière à obtenir de nouveaux composés (moléculaires, ioniques ou atomiques).

Définition 3

Les espèces chimiques qui disparaissent au cours de la transformation chimique sont appelées les réactifs.

Dans l'exemple ci-dessus, le dihydrogène et le dioxygène sont les réactifs.

Définition 4

Les espèces chimiques qui apparaissent au cours de la transformation chimique sont appelées les produits.

Dans l'exemple ci-dessus, l'eau est le produit.

3 Représentation d'une transformation chimique

On modélise une transformation chimique par une réaction chimique.

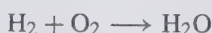
Celle-ci peut se représenter par une écriture symbolique, appelée équation ou équation-bilan de la réaction. Elle se présente en général de la manière suivante :



À la place du mot *réactifs* dans l'expression ci-dessus, on dresse la liste des formules brutes des réactifs, que l'on sépare par des signes « plus ».

De même, à la place du mot *produits* dans l'expression ci-dessus, on dresse la liste des formules brutes des produits, que l'on sépare par des signes « plus ».

Exemple : Reprenons l'exemple de la synthèse de l'eau que nous avons vu ci-dessus. Nous avons vu que du dihydrogène (H_2) et du dioxygène (O_2) réagissent pour former de l'eau (H_2O). La réaction associée à cette transformation se représente donc formellement par :



⚠ ATTENTION

La réaction chimique ci-dessus n'est pas écrite sous une forme définitive. Il faut à présent l'*équilibrer*.

Nous allons voir à présent que certaines quantités se conservent au cours d'une transformation chimique. *Équilibrer* la réaction correspondante permet de tenir compte de la conservation de ces quantités.

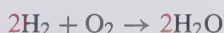
4 Lois de conservation au cours d'une transformation chimique

➡ À RETENIR

Les éléments chimiques et les quantités de matière de chacun des éléments se conservent au cours d'une transformation chimique.

Dans l'exemple ci-dessus, les éléments hydrogène et oxygène sont présents dans les réactifs et dans les produits.

Pour traduire la conservation des quantités de matière de ces deux éléments, on écrit des *coefficients stœchiométriques* dans la réaction chimique. Ce sont les nombres en rouge dans l'équation-bilan ci-dessous :



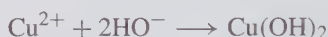
Ainsi, si on part au début avec quatre atomes d'hydrogène H (donc seulement deux molécules de dihydrogène H_2) et deux atomes d'oxygène O, on se retrouve bien à l'arrivée avec quatre atomes d'hydrogène et deux atomes d'oxygène (dans les deux molécules d'eau) comme on peut le lire sur l'équation-bilan ci-avant. Une manière abrégée de résumer ceci consiste à dire qu'on a autant d'hydrogènes (quatre) de part et d'autre de la flèche, et qu'on a aussi autant d'oxygènes (deux) de part et d'autre de la flèche.

Écrire les coefficients stœchiométriques pour que chaque élément soit autant représenté dans les réactifs que dans les produits s'appelle *équilibrer* l'équation-bilan.

À RETENIR

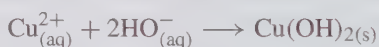
La charge électrique se conserve au cours d'une transformation chimique.

Exemple : la transformation chimique conduisant à la formation d'un précipité d'hydroxyde de cuivre II peut être modélisée par une réaction chimique dont l'équation bilan est :



On voit que la charge électrique totale des réactifs est nulle : $2 + 2 \times (-1) = 0$, ainsi que la charge des produits.

Notons qu'en toute rigueur on devrait spécifier l'état des réactifs et produits dans cette équation-bilan, de la manière suivante :



Ici, l'indice (aq) signifie « en solution aqueuse », l'indice (s) signifie « à l'état solide ». De la même manière, on utilise fréquemment l'indice (g) pour l'état gazeux.

Les coefficients stœchiométriques peuvent aussi bien s'interpréter au niveau *moléculaire* qu'au niveau *molaire*. Ainsi, on peut lire l'équation-bilan de la synthèse de l'eau de deux manières différentes :

- Deux molécules de dihydrogène réagissent sur une molécule de dioxygène pour former deux molécules d'eau, ou bien :
- Deux moles de dihydrogène réagissent sur une mole de dioxygène pour former deux moles d'eau.

À RETENIR

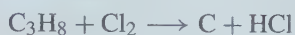
Dans un exercice, il faut *toujours* équilibrer une équation-bilan avant de commencer les calculs.

La transformation chimique prend fin lorsque l'un des réactifs disparaît complètement. On parle de réactif *limitant*. On dit d'un réactif qui ne disparaît pas complètement qu'il est en *excès*. Lorsque tous les réactifs disparaissent (aucun n'est alors en excès) on dit qu'ils étaient initialement dans des proportions stœchiométriques.

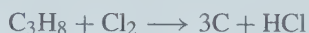
→ Solution de l'exercice type

Lycée Pierre Corneille, Rouen

Partons de l'équation-bilan non équilibrée :



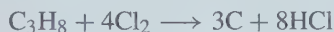
Nous voyons que nous avons 3 moles d'élément carbone C à gauche et une mole à droite. Pour équilibrer la quantité d'élément carbone, nous mettons un coefficient 3 au carbone du côté des produits :



À présent, nous voyons que nous avons 8H à gauche et seulement H à droite : pour équilibrer la quantité d'élément hydrogène nous mettons un coefficient 8 à HCl.



Attention ! Ce 8 se distribue sur l'élément H et l'élément Cl. En effet, la fin de l'équation-bilan se lit : « ... et huit moles de HCl ». Nous avons donc 8 moles d'élément Cl dans les produits, et une mole de Cl_2 (soit deux moles d'élément Cl) dans les réactifs. Pour équilibrer, on rajoute un coefficient 4 à Cl_2 :



L'équation-bilan est à présent équilibrée.

🔧 MÉTHODE

Pour être certain que notre solution est juste, il nous faut recompter les quantités de chacun des éléments (ici C, H et Cl).

Élément	réactifs	produits
C	3	3
H	8	8
Cl	$4 \times 2 = 8$	8

Le compte est bon.

Voir énoncé page 361

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 369

- 1 Identifier la réaction chimique qui n'est pas correctement équilibrée :
- a** $C + 2 CuO \rightarrow 2 Cu + CO_2$
- b** $C_{12}H_{22}O_{11} + 12 O_2 \rightarrow 12 CO_2 + 11 H_2O$
- c** $C_8H_{18} + 17 O_2 \rightarrow 8 CO_2 + 9 H_2O$
- 2 On considère l'équation-bilan : $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$. Identifier dans la liste ci-dessous la ou les équation(s)-bilan qui lui est (sont) équivalente(s) :
- a** $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2 + 2O$
- b** $N_2 + H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2 + 2O$
- c** $2N_2H_4 + 2O_2 \rightarrow 2N_2 + 4H_2O$
- d** $2N_2H_4 + O_2 \rightarrow 2N_2 + 2H_2O$

2 Équilibrer des équations-bilan

★★

5 min

Corrigé
p. 369

Lycée Émile Zola, Chateaudun

Équilibrer les équations-bilan suivantes :

- 1 $CuO + C \rightarrow Cu + CO_2$
- 2 $Cu + O_2 \rightarrow CuO$

3 Équations-bilan

★★

10 min

Corrigé
p. 369

Lycée Gabriel Fauré, Paris

Équilibrer les équations-bilan suivantes :

- 1 $C_2H_6O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- 2 $C_6H_6 + O_2 \rightarrow 2C + CO_2 + H_2O$
- 3 $H_2 + Fe_3O_4 \rightarrow H_2O + FeO$

4 Synthèse d'alumine

★★

15 min

Corrigé
p. 370

Lycée Alexandre Dumas, Saint Cloud

On caractérise une transformation chimique par ses états initial et final :

- *Corps présents à l'état initial* : aluminium solide, eau liquide et diazote gazeux
- *Corps présents à l'état final* : oxyde d'aluminium Al_2O_3 solide, dihydrogène gazeux, aluminium solide et diazote gazeux

- 1 Déterminer les produits de la réaction correspondante. Justifier.

- 2 En déduire les réactifs de la réaction correspondante. Justifier.
- 3 Quel est le réactif en excès ? Justifier.
- 4 Y a-t-il des espèces chimiques spectatrices, c'est-à-dire ne participant pas à la transformation chimique ? Justifier.
- 5 Écrire et équilibrer l'équation de la réaction correspondante.

5 Équations de combustion

★★★

5 min

Corrigé
p. 370

Lycée Champlain, Chennevières

Écrire et équilibrer l'équation-bilan de la combustion complète dans le dioxygène (la combustion complète des hydrocarbures produit de l'eau et du dioxyde de carbone).

- 1 du propane C_3H_8 .
- 2 du propène C_3H_6 .

6 Équilibrer des équations-bilan

★★★

10 min

Corrigé
p. 371

Lycée Pierre Termier, Grenoble

Équilibrer les équations-bilan des réactions suivantes :

- 1 $CH_4 + O_2 \rightarrow H_2O + CO_2$
- 2 $Ni + O_2 \rightarrow NiO$
- 3 $Fe + Cl_2 \rightarrow FeCl_3$
- 4 $PbO + C \rightarrow Pb + CO_2$
- 5 $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O$
- 6 $Cu_2S + O_2 \rightarrow Cu_2O + SO_2$
- 7 $Cu + O_2 \rightarrow Cu_2O$
- 8 $C_3H_8 + Cl_2 \rightarrow C + HCl$

7 Équilibrer des équations

★★★

15 min

Corrigé
p. 371

Lycée Auguste Renoir, Limoges

Équilibrer les équations des réactions chimiques suivantes :

- 1 $Zn_{(s)} + HCl_{(aq)} \rightarrow ZnCl_{2(aq)} + H_{2(g)}$
- 2 $C_3H_8 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- 3 $FeS_2 + O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + SO_2$
- 4 $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

- 5 $\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{S}_{(\text{s})} + \text{H}_2\text{O}$
- 6 $\text{Al}_{(\text{s})} + \text{HCl}_{(\text{aq})} \rightarrow \text{AlCl}_{3(\text{aq})} + \text{H}_{2(\text{g})}$
- 7 $\text{CaCl}_2 + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{AgCl} + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

8 Équilibrer les équations

★★★

25 min

Corrigé
p. 373

Lycée Paul Langevin, Suresnes

Écrire et équilibrer l'équation des réactions décrites ci-dessous.

- 1 L'aluminium métallique Al réagit avec les ions hydrogène de l'acide chlorhydrique. Il y a un dégagement gazeux de dihydrogène et formation d'ions aluminium Al^{3+} .
- 2 Lorsqu'on verse quelques gouttes d'une solution de soude de formule $\text{Na}_{(\text{aq})}^+ + \text{HO}_{(\text{aq})}^-$ dans une solution de sulfate de cuivre (II) de formule $\text{Cu}_{(\text{aq})}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$, il se forme un précipité d'hydroxyde de cuivre (II) $\text{Cu}(\text{OH})_2$.
- 3 Les ions plomb (II) $\text{Pb}_{(\text{aq})}^{2+}$ réagissent avec les ions iodure $\text{I}_{(\text{aq})}^-$ pour donner un précipité d'iodure de plomb PbI_2 .
- 4 Pour fabriquer de l'eau liquide, on fait réagir du dihydrogène et du dioxygène.
- 5 Quand on fait réagir du fer et du dichlore (gazeux), on obtient du chlorure de fer (III) solide FeCl_3 .

Stœchiométrie

★★★

10 min

Corrigé
p. 375

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

Ajuster la stœchiométrie des équations chimiques suivantes :

- 1 $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 2 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 3 $\text{Al} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$
- 4 $\text{FeCl}_3 + \text{MgO} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgCl}_2$
- 5 $\text{Pb}^{2+} + \text{I}^- \rightarrow \text{PbI}_4^{2-}$
- 6 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6\text{O} + \text{CO}_2$
- 7 $\text{Cu}^{2+} + \text{HO}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2$

1 QCM Testez vos connaissances

➔ **Énoncé**
p. 366

- 1 L'équation-bilan **C** n'est pas correctement équilibrée : manifestement, le nombre d'atomes d'oxygène n'est pas conservé : ce nombre est pair (34) du côté des réactifs, et impair (25) du côté des produits.
- 2 L'équation-bilan **C** est équivalente à celle de départ (elle s'obtient en multipliant tous ses coefficients par 2). Il est à noter que les expressions 1. et 2. sont rigoureusement impossibles. Il est impossible d'avoir des atomes d'oxygène isolés, n'appartenant pas à une molécule, et la molécule de H_4 n'existe évidemment pas...

2 Équilibrer des équations-bilan

➔ **Énoncé**
p. 366

Lycée Émile Zola, Chateaudun

On ajuste les coefficients stœchiométriques de manière à avoir le même nombre de moles de chaque élément de chaque côté de la flèche, comme expliqué à l'exercice précédent :



3 Équations-bilan

➔ **Énoncé**
p. 366

Lycée Gabriel Fauré, Paris

MÉTHODE

Pour résoudre ce genre d'exercice, on commence par ajuster les coefficients stœchiométriques des éléments représentés une seule fois dans les réactifs et une seule fois dans les produits (par exemple le carbone et l'hydrogène pour la première équation-bilan). Ensuite on ajuste les coefficients des autres éléments. Éventuellement, si on a pour cela été obligé de mettre des coefficients rationnels, on les « réduit tous au même dénominateur » pour finalement ne garder que les numérateurs, de manière à avoir des coefficients stœchiométriques entiers. Enfin, on vérifie une dernière fois que l'on a bien le même nombre d'atomes d'un même élément de part et d'autre de la flèche.

Il est crucial de bien équilibrer une équation-bilan, sinon tout le problème qui suit peut être faux, même si les raisonnements sont justes !

Pour les équations de l'énoncé, on trouve :



(il faut prendre garde qu'ici le coefficient 2 du carbone était fixé).

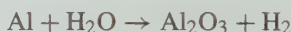


4 Synthèse d'alumine

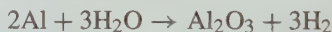
➔ **Énoncé**
p. 366

Lycée Alexandre Dumas, Saint Cloud

- 1 Les produits de la réaction sont les espèces chimiques présentes à l'état final, mais absentes à l'état initial. Il s'agit donc de l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et du dihydrogène H_2 .
- 2 Il faut identifier à l'état initial les espèces chimiques pouvant apporter les éléments présents dans les réactifs, à savoir les éléments aluminium, oxygène et hydrogène.
La seule espèce chimique susceptible d'apporter l'élément aluminium est l'aluminium solide, donc il s'agit d'un réactif. La seule espèce chimique présente à l'état initial susceptible d'apporter les éléments oxygène et hydrogène est l'eau H_2O , donc il s'agit également d'un réactif.
- 3 L'eau a disparu à l'état final, alors que l'on a encore de l'aluminium solide : ce dernier est donc le réactif en excès.
- 4 On voit que le diazote gazeux N_2 n'est ni un produit, ni un réactif : il est présent à tout instant dans le milieu réactionnel (donc aux instants initial et final) sans participer à la réaction. C'est une espèce chimique spectatrice.
- 5 L'équation-bilan de la réaction, non équilibrée, s'écrit :



On équilibre les quantités de matière successivement en aluminium, oxygène et hydrogène, et l'on obtient :



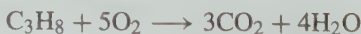
5 Équations de combustion

➔ **Énoncé**
p. 367

Lycée Champlain, Chennevières

On ajuste de la même manière que précédemment les coefficients stœchiométriques de manière à avoir la même quantité de matière de chaque élément représenté de part et d'autre de la flèche.

- 1 Combustion complète du propane :



- 2 Combustion complète du propène :

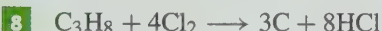
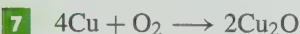
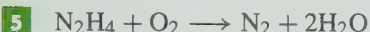
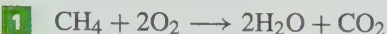


6 Équilibrer des équations-bilan

Enoncé
p. 367

Lycée Pierre Termier, Grenoble

On ajuste les coefficients stœchiométriques de manière à avoir le même nombre de moles de chaque élément du côté des réactifs et du côté des produits.



7 Équilibrer des équations

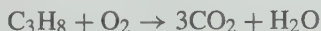
Enoncé
p. 367

Lycée Auguste Renoir, Limoges

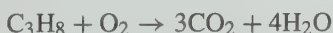
- 1 Les atomes de zinc Zn sont déjà équilibrés (un atome dans les réactifs et un atome dans les produits). Par conséquent nous ne touchons plus ni au coefficient stœchiométrique du zinc solide dans les réactifs, ni au coefficient du chlorure de zinc dans les produits. Il nous faut donc à présent équilibrer l'élément chlore. On voit qu'il faut deux molécules de chlorure d'hydrogène dans les réactifs pour assurer la conservation de la quantité de matière en chlore. Une fois ajusté le coefficient stœchiométrique du chlorure d'hydrogène, on voit que la conservation de l'élément hydrogène est assurée :



- 2 L'élément carbone ne figure que dans un réactif et un produit. On commence donc par assurer la conservation de la quantité de matière en atomes de carbone. Cela se fait en ajustant le coefficient stœchiométrique du dioxyde de carbone :

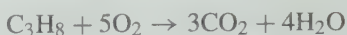


De la même manière, l'élément hydrogène n'est présent que dans un réactif et un produit. Pour assurer sa conservation, il faut ajuster le coefficient stœchiométrique de l'eau :

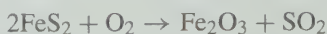


Il ne nous reste plus qu'à assurer la conservation de la quantité de matière en atomes d'oxygène. Nous avons $3 \times 2 + 4 = 10$ atomes d'oxygène

dans les produits, il nous faut donc cinq molécules de dioxygène dans les réactifs pour en assurer la conservation :



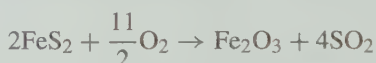
- 3** L'élément fer et l'élément soufre, respectivement, ne sont présents que dans un réactif et dans un produit. Commençons ainsi à équilibrer l'élément fer. On voit qu'il faut deux moles de sulfure de fer dans les réactifs pour assurer la conservation de la quantité de matière d'atomes de fer :



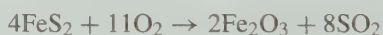
Il nous faut assurer à présent la conservation de l'élément soufre, ce qui se fait en ajustant le coefficient stœchiométrique du dioxyde de soufre :



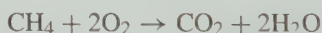
Pour finir nous équilibrons les quantités de matière en atomes d'oxygène. Les coefficients des produits sont fixés, le seul coefficient que nous puissions ajuster est celui du dioxygène dans les réactifs :



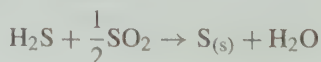
Il est légitime d'avoir des coefficients non entiers si l'on raisonne au niveau des quantités de matière. Si l'on raisonne, en revanche, directement au niveau du nombre d'entités élémentaires, on préférera utiliser des coefficients entiers. Pour ce faire, on multiplie par deux tous les coefficients de l'équation-bilan ci-dessus :



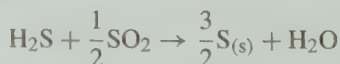
- 4** Nous utilisons ici la même procédure que pour la deuxième question. Nous obtenons :



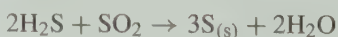
- 5** L'élément hydrogène et l'élément oxygène ne sont présents chacun que dans un seul réactif et dans un seul produit. L'élément hydrogène est déjà équilibré, donc on ne touche pas aux coefficients stœchiométrique du sulfure d'hydrogène et de l'eau. Nous équilibrons à présent les quantités de matière en atomes d'oxygène :



Enfin, il nous faut équilibrer les quantités de matière en atomes de soufre, de la manière suivante :



De la même manière que précédemment, nous nous ramenons à des coefficients entiers en multipliant par le plus petit commun multiple des dénominateurs, à savoir, ici, 2 :



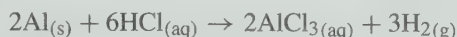
- 6** L'élément aluminium étant déjà équilibré, on ne touche pas aux coefficients stœchiométriques de l'aluminium (dans les réactifs) et du chlorure d'aluminium (dans les produits). On peut donc équilibrer la quantité de matière en atomes de chlore :



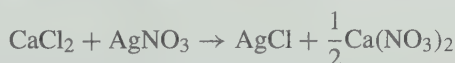
puis en atomes d'hydrogène :



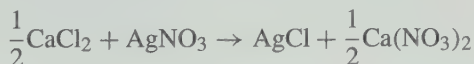
Pour terminer nous nous ramenons à des coefficients entiers :



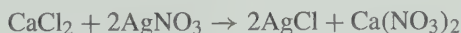
- 7** Dans cette question, nous voyons que l'azote et l'oxygène sont toujours et exclusivement présents, tant dans les réactifs que dans les produits, dans le groupement NO_3 . Il serait donc maladroit de tenter d'équilibrer indépendamment la quantité de matière en atomes d'azote, puis en atomes d'oxygène. Il est plus rapide et plus simple de considérer ce groupement comme une entité élémentaire dont on équilibre les quantités de matière entre réactifs et produits. Les quantités de matière de l'atome d'argent étant équilibrées, on ne touche pas aux coefficients stœchiométriques du nitrate d'argent (réactif) et du chlorure d'argent (produits). Pour équilibrer les quantités de matière en groupement NO_3 , on ajuste donc le coefficient stœchiométrique du nitrate de calcium :



Nous ajustons enfin les quantités de matière en atomes de calcium :



et nous vérifions que les quantités de matière en atomes de calcium sont équilibrées. Enfin, nous nous ramenons à des coefficients stœchiométriques entiers :

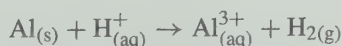


6 Équilibrer les équations

➔ **Énoncé**
p. 368

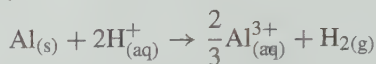
Lycée Paul Langevin, Suresnes

- 1** On commence par écrire l'équation bilan de la réaction, non équilibrée. Du côté des réactifs nous avons l'aluminium Al et des ions H^+ . Du côté des produits nous avons du dihydrogène H_2 et des ions aluminium Al^{3+} . Ainsi :

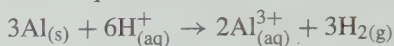


Il nous faut à présent équilibrer cette équation bilan. On commence par équilibrer les quantités de matière en hydrogène, puis on équilibre la

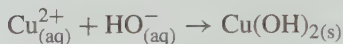
charge électrique, et enfin on équilibre les quantités de matière en aluminium. Ceci donne :



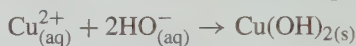
que l'on peut réécrire de la manière suivante, si l'on souhaite avoir des coefficients stœchiométriques entiers :



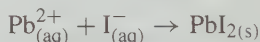
- 2** On voit que les ions sulfate et sodium sont spectateurs : ils n'interviennent pas dans l'équation-bilan de la réaction. Celle-ci, non équilibrée, est donc :



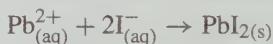
On équilibre la quantité de matière en hydroxyde, puis on vérifie que la charge des réactifs est nulle, à l'instar de celle du produit. On obtient :



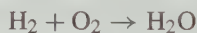
- 3** L'équation-bilan de la réaction, non équilibrée, est :



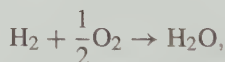
On équilibre les quantités de matière en iode, et on vérifie que la charge des réactifs est nulle, à l'instar de celle du produit. On obtient :



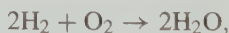
- 4** L'équation-bilan non équilibrée est bien sûr :



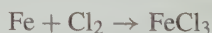
La quantité de matière en hydrogène est la même pour les réactifs et produits. En revanche, il faut ajuster le coefficient stœchiométrique du dioxygène pour assurer la conservation de la quantité de matière en oxygène :



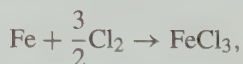
que l'on peut réécrire de la manière suivante, si l'on souhaite que les coefficients stœchiométriques soient entiers :



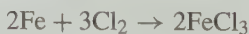
- 5** L'équation-bilan de la réaction, non équilibrée, est :



La quantité de matière en fer est conservée. En revanche, il faut ajuster le coefficient stœchiométrique du dichlore pour conserver la quantité de matière en chlore :



que l'on peut réécrire de la manière suivante, si l'on souhaite que les coefficients stœchiométriques soient entiers :

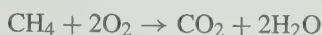


Stœchiométrie

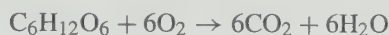
➔ **Énoncé**
p. 368

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

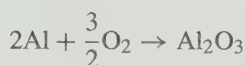
- 1** Le nombre d'atomes de carbone est identique pour les réactifs et les produits. On équilibre les atomes d'hydrogène, puis on termine par les atomes d'oxygène. On obtient :



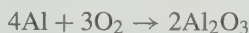
- 2** On équilibre tout d'abord les atomes de carbone et d'hydrogène, puis on termine par les atomes d'oxygène. On obtient :



- 3** On équilibre indépendamment les atomes d'aluminium et ceux d'oxygène. On obtient :



ou encore, si l'on veut se limiter à des coefficients entiers :



- 4** On commence par équilibrer les atomes de fer, puis ceux de chlore. On termine alors par ceux de magnésium. On obtient :



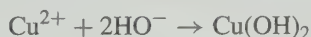
- 5** On équilibre l'élément iode, et on vérifie que la charge totale des produits et des réactifs est conservée :



- 6** On équilibre les atomes d'hydrogène, puis ceux de carbone. On vérifie que la quantité de matière en atomes d'oxygène est conservée :



- 7** On équilibre la quantité de matière en hydroxyde dans les réactifs et les produits, puis on vérifie que la charge totale des réactifs est nulle :



Les médicaments

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Principes actifs chimiques et naturels

Thème : la santé

1 Introduction

Exercice type

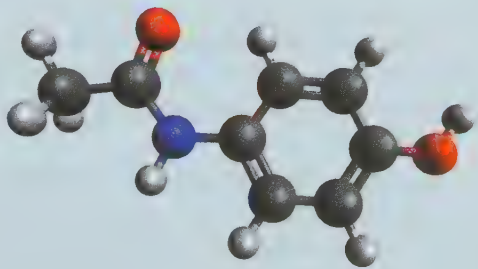
Lycée Saint-Louis, Paris

Sur la notice d'une boîte de comprimés de paracétamol, on lit :

Paracétamol	500 mg
Autres composants talc, silice colloïdale, stéarate de magnésium	

- 1 Qu'est-ce qu'un excipient ? Quels sont les excipients de ce médicament ?
- 2 Quel est le principe actif de ce médicament ?

La figure ci-dessous montre un modèle moléculaire éclaté d'une molécule de paracétamol.



- 3 Donner la formule développée, puis la formule brute du paracétamol.
- 4 Quelle est la masse molaire moléculaire du paracétamol ?
- 5 Quelle est la quantité de matière en paracétamol d'un comprimé ?

Indications : dans une molécule, les atomes de carbone possèdent quatre liaisons, les atomes d'oxygène en possèdent deux, les atomes d'azote trois et les atomes d'hydrogène une seule.

Données :

- $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- $M(\text{N}) = 14 \text{ g.mol}^{-1}$

Voir corrigé page 381

Dans ce chapitre nous abordons des notions spécifiques aux médicaments, telles que celles de principe actif et d'excipient.

2 Définitions

Définition 1

Un médicament est une substance ou composition présentant des propriétés thérapeutiques : elle peut soigner une maladie (propriétés *curatives*), empêcher la survenue d'une maladie ou de symptômes (propriétés *préventives*).

Par extension le terme médicament peut également désigner une substance ou composition utilisée pour un diagnostic médical ou une intervention médicale (même si ladite substance n'a en soi ni propriété curative ni propriété préventive). Généralement, plusieurs substances entrent dans la composition d'un médicament.

Définition 2

Parmi les substances entrant dans la composition d'un médicament, celle qui a des propriétés thérapeutiques est appelée *principe actif* (ou substance active).

Remarque : un même médicament peut avoir plusieurs principes actifs.

Les autres substances présentes dans un médicament n'ont pas de rôle thérapeutique. Leur fonction est d'assurer, entre autres, la stabilité et conservation du principe actif, sa libération à l'endroit voulu dans le corps humain, ainsi que son identification (par exemple par la couleur d'une gélule). Ce sont les excipients.

Exemple : il existe un type de gélules, dites gastro-résistantes, qui ne se délitent pas au passage du milieu très acide de l'estomac, et qui permettent l'absorption du principe actif au-delà de l'estomac. On voit ici que les excipients constituant l'enrobage de la gélule jouent un rôle sur l'endroit où le principe actif est absorbé.

Les excipients ne doivent bien sûr pas réagir chimiquement avec le ou les principe(s) actif(s), et leur absorption doit être sans danger pour le patient.

Définition 3

On appelle excipient toute substance n'entrant pas dans les principes actifs d'un médicament, sans effet thérapeutique, dont le rôle est d'aider l'absorption du principe actif.

Remarque : la quantité d'excipient n'est pas importante en soi. Sur les notices de médicaments, on trouve fréquemment l'abréviation QSP, qui signifie « quantité suffisante pour », impliquant qu'au principe actif on a ajouté l'excipient de manière à atteindre la masse totale ou le volume total requis pour le médicament.

La *formulation* ou forme galénique d'un médicament correspond à la consistance ou forme qui lui est donnée : sirop (solution buvable), gélule, sachet, comprimé, suspension injectable, gouttes ophtalmiques, etc.

Pour identifier de manière unique et sans ambiguïté les principes actifs dans le monde entier, on utilise la *Dénomination Commune Internationale* (DCI), qui attribue une appellation unique à chaque principe actif. On parle également de *nom générique*.

À RETENIR

Principe actif : substance ayant des propriétés thérapeutiques.

Excipient : substance sans effet thérapeutique généralement utile à la conservation ou à la formulation du médicament.

3 Principes actifs chimiques et naturels

Certains principes actifs ne peuvent être obtenus que par synthèse. C'est le cas par exemple du paracétamol.

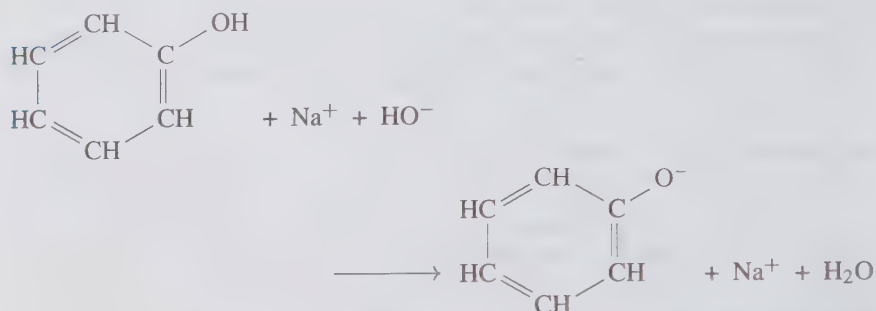
D'autres peuvent être obtenus directement à l'état naturel. Enfin, certains médicaments peuvent être fabriqués à partir de composés que l'on trouve à l'état naturel, ou être entièrement synthétisés. C'est le cas par exemple de l'aspirine, qui peut être soit fabriquée à partir d'un composé présent dans l'écorce de saule, la *salicine* ou acide salicylique (les vertus thérapeutiques du saule étaient connues depuis l'Antiquité) soit entièrement synthétisée de manière industrielle. Nous indiquons ci-après les différentes étapes de cette synthèse.

3.1 Synthèse industrielle de l'aspirine

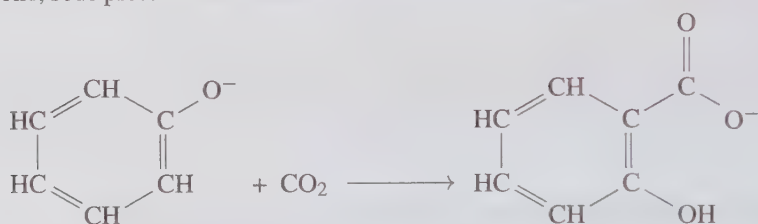
L'aspirine, ou acide acétylsalicylique, fabriquée pour la première fois à la fin du dix-neuvième siècle par le chimiste allemand Félix Hoffmann, est l'un des médicaments les plus vendus dans le monde. L'aspirine a des propriétés antalgiques (qui calment la douleur), antipyrétiques (qui font baisser la fièvre) et anti-inflammatoires.

Industriellement, l'aspirine est fabriquée à partir du phénol.

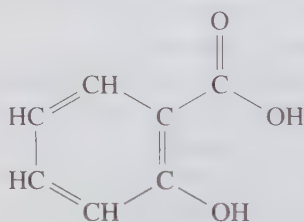
La première étape consiste à faire réagir le phénol et de la soude :



On obtient du phénate de sodium que l'on fait ensuite réagir avec du dioxyde de carbone, sous pression et à chaud :



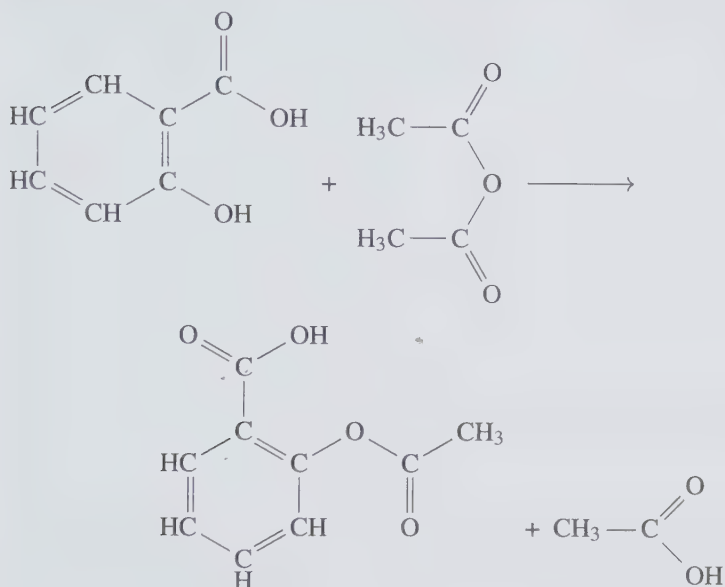
On obtient ainsi l'ion salicylate que l'on fait réagir ensuite avec des ions H^+ pour obtenir l'acide carboxylique suivant :



L'acide carboxylique obtenu est appelé acide salicylique. Cet acide possède des propriétés thérapeutiques très intéressantes, mais est mal supporté par l'organisme à fortes doses. C'est cet acide qui est présent à l'état naturel dans l'extrait d'écorce de saule. Ici, nous venons de montrer comment l'obtenir de manière synthétique à partir du phénol. Naturellement, les molécules d'acide salicylique obtenus par synthèse, ou extraites de l'écorce de saule, sont exactement les mêmes et ont mêmes propriétés physiques et chimiques. Elles sont *indiscernables* (on ne peut pas les distinguer les unes des autres).

La dernière étape consiste à transformer l'acide salicylique en acide acétylsalicylique (aspirine), qui a les mêmes propriétés thérapeutiques, mais qui est bien mieux supporté par l'organisme.

Pour cela, on fait réagir l'acide salicylique avec l'anhydride éthanóïque :



aspirine

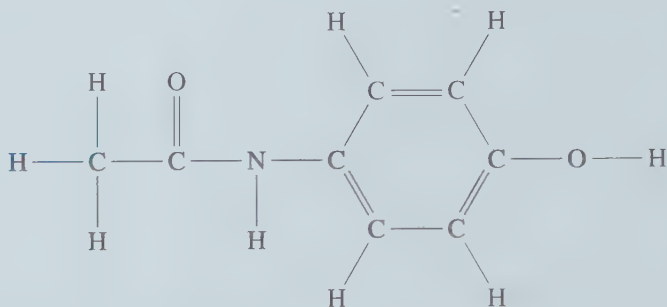
➔ Solution de l'exercice type

Lycée Saint-Louis, Paris

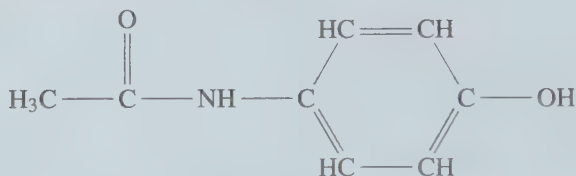
- 1 Un excipient est une substance autre que le principe actif, dont le rôle est de conférer une consistance et éventuellement une forme donnée au médicament, et de permettre le transport de la substance active jusqu'à son site d'absorption, sans interagir chimiquement avec celle-ci. Dans la notice de ce médicament, les excipients figurent à la rubrique « autres composants » et sont donc le talc, la silice colloïdale et le stéarate de magnésium.
- 2 Le principe actif de ce médicament est le paracétamol.
- 3 Compte-tenu des indications données dans l'énoncé, il est facile d'identifier que les atomes représentés en blanc sont les atomes d'hydrogène (une seule liaison par atome), ceux représentés en noir sont les atomes de carbone (quatre liaisons pour chacun d'entre eux) et ceux représentés en rouge sont les atomes d'oxygène (deux liaisons pour chacun d'eux). Celui qui est représenté en bleu possède trois liaisons et est un atome d'azote.

...

Nous sommes donc en mesure de donner la formule développée du paracétamol :



ainsi que sa formule semi-développée :



Nous déduisons enfin la formule brute en comptant le nombre de chaque type d'atome. Nous obtenons C₈H₉NO₂.

- 4 La masse molaire moléculaire du paracétamol est :

$$M_{\text{paracétamol}} = 8M(\text{C}) + 9M(\text{H}) + M(\text{N}) + 2M(\text{O})$$

soit

$$M = 8 \times 12 + 9 + 14 + 2 \times 16 = 151 \text{ g.mol}^{-1}$$

- 5 D'après les indications, la masse de paracétamol dans le comprimé est $m = 500 \text{ mg}$. La quantité de matière n en paracétamol dans un comprimé est donnée par :

$$n = \frac{m}{M_{\text{paracétamol}}} = \frac{0,5}{151} = 3,3 \times 10^{-3} \text{ mol} = 3,3 \text{ mmol}$$

Notons qu'il faut exprimer préalablement, comme nous l'avons fait, la masse d'un comprimé en grammes, puisque la masse molaire est donnée en gramme par mole.

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 391

- 1 Deux médicaments ayant le même excipient ont la même indication thérapeutique (c'est-à-dire qu'ils traitent ou préviennent la même maladie ou les mêmes symptômes)
- ☐ a Vrai ☐ b Faux
- 2 L'étiquette d'un sirop A porte l'indication suivante :

Paracétamol (DCI).....	3 g
Excipient (QSP).....	100 mL

tandis que l'étiquette d'un sirop B porte l'indication suivante :

Paracétamol (DCI).....	5 g
Excipient (QSP).....	200 mL

- (a) Les initiales DCI signifient :
- ☐ a Dose Caractéristique Infantile
☐ b Dénomination Commune Internationale
☐ c Directement Calculé *In situ*
- (b) Les initiales QSP signifient :
- ☐ a Quantité Suffisante Pour
☐ b Quota Supérieur Patient
☐ c Qualité Standard Pharmaceutique
- (c) La concentration du principe actif est la plus grande :
- ☐ a Dans le sirop A
☐ b Dans le sirop B

2 Étude de l'ibuprofène

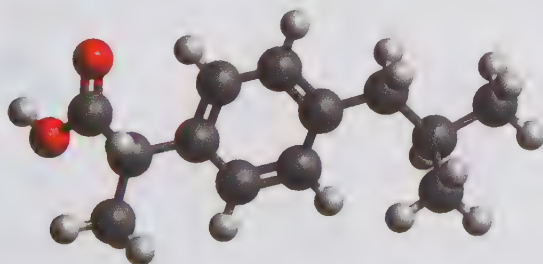


10 min

Corrigé
p. 391

Lycée Condorcet, Paris

La figure ci-dessous montre un modèle moléculaire éclaté de la molécule d'ibuprofène, utilisée comme principe actif pour ses propriétés anti-inflammatoires.



- 1 Donner la formule développée de cette molécule.
- 2 À quelle famille appartient cette molécule ? Écrire sa formule semi-développée en faisant apparaître son groupe caractéristique.

Indications : dans une molécule, les atomes de carbones possèdent quatre liaisons covalentes, les atomes d'oxygène en possèdent deux et les atomes d'hydrogène une seule.

3 Principes actifs

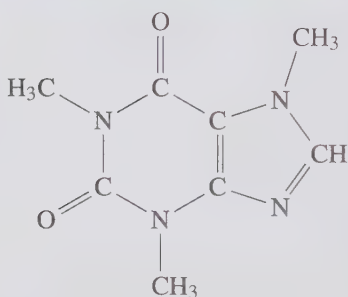
★★

10 min

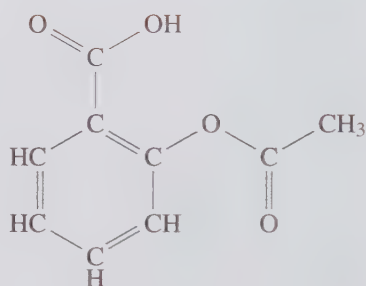
Corrigé
p. 392

Lycée Auguste Renoir, Limoges

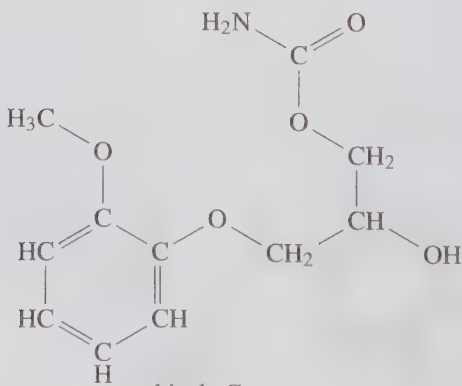
On considère les molécules suivantes :



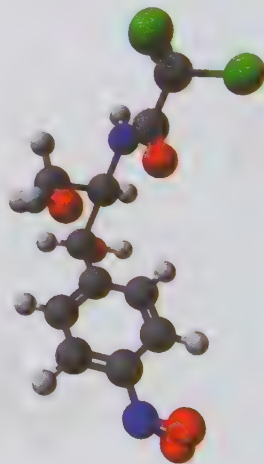
molécule A



molécule B



molécule C



molécule D

Les informations suivantes vous permettront de répondre aux questions 1 à 4.

- Le **méthocarbamol** est un relaxant musculaire ayant des propriétés analgésiques. Sa molécule contient un groupe amide et un groupe hydroxyle.
- La **caféine** est un stimulant du système nerveux central. Sa molécule possède deux cycles accolés.
- Le **chloramphénicol** est une molécule présentant des propriétés antibiotiques. Il est utilisé contre la fièvre typhoïde. Comme son nom l'indique, il possède un ou plusieurs groupe(s) « chlorure ».
- L'**aspirine** a des propriétés analgésiques et antipyrétiques. Sa molécule possède un groupe carboxyle et un groupe ester.

- 1 Quelle est la valence des atomes représentés en vert sur le modèle moléculaire éclaté de la molécule D ? En utilisant les informations du texte ci-dessus et en procédant par élimination, en déduire la nature de ces atomes et identifier la molécule D.
- 2 Donner la formule semi-développée de la molécule D.
- 3 Identifier les molécules A à C.
- 4 Recopier les formules semi-développées de l'aspirine et du méthocarbamol et faire ressortir leurs groupes caractéristiques mentionnés dans le texte.

Composition d'un médicament

★★

10 min

Corrigé
p. 393

Lycée Léonard de Vinci, Saint-Germain-en-Laye

On s'intéresse à la composition d'un médicament utilisé pour le traitement symptomatique du rhume et de l'état grippal. On réalise la chromatographie sur couche mince d'un échantillon de ce médicament, ainsi que de trois échantillons respectivement de caféine, d'aspirine et de paracétamol. On obtient le chromatogramme représenté sur la figure 17.1.

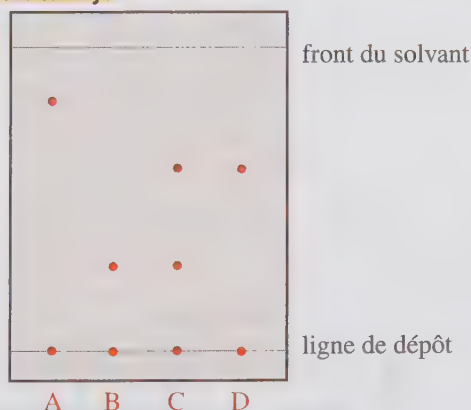


Figure 17.1 – Chromatogramme décrit dans l'énoncé.

On admettra que des trois espèces envisagées ci-dessus, la mieux entraînée par l'éluant est l'aspirine, et la moins bien entraînée est le paracétamol. On pourra consulter les notions relatives à la chromatographie en page 234.

- 1 Identifier à quel échantillon (caféine, aspirine, paracétamol ou médicament) correspondent les colonnes A, B, C et D.
- 2 Que contient le médicament ?

5

Identification de principes actifs

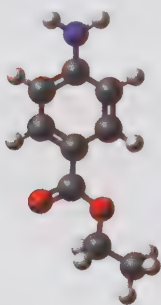
★★

10 min

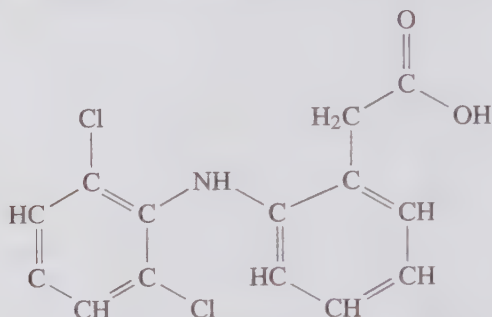
Corrigé
p. 394

Lycée Stanislas, Paris

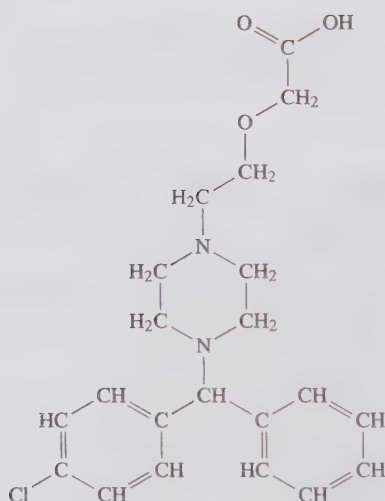
Les molécules représentées ci-dessous sont, dans le désordre, des molécules de diclofénac (un anti-inflammatoire non stéroïdien), de cétirizine (un antihistaminique utilisé dans le traitement des allergies), de benzocaïne (un anesthésique local), et d'orphénadrine (un antispasmodique).



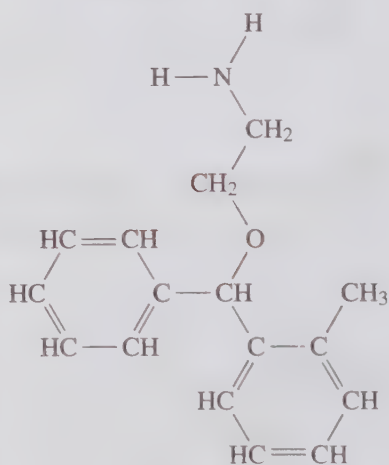
molécule A



molécule B



molécule C



molécule D

- 1 Écrire la formule semi-développée de la molécule A.
- 2 Identifier chacune des molécules, sachant que l'orphénadrine n'a pas de fonction ester, que la molécule de cétirizine possède au moins un atome de chlore, que le diclofénac possède un groupe caractéristique « acide carboxylique » et n'a pas la plus grande masse molaire moléculaire parmi les quatre molécules présentées.
- 3 Quels sont les principes actifs qui possèdent le groupe caractéristique amine ? Identifier ce groupe sur leurs formules semi-développées.

Données : • $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$ • $M(\text{Cl}) = 35,5 \text{ g.mol}^{-1}$



Princes et génériques



10 min

Corrigé
p. 396**Lycée Albert Sorel, Honfleur**

Un médicament princeps est un médicament qui incorpore un principe actif nouveau. Le laboratoire qui l'a développé dépose un brevet qui lui assure l'exclusivité de l'exploitation et de la commercialisation du médicament, ce qui lui permet de couvrir ses frais de recherche et développement.

Lorsque le brevet expire, n'importe quel laboratoire peut fabriquer des médicaments contenant le principe actif. On parle alors de médicament générique.

On considère trois médicaments A, B et C.

Sur la notice du médicament A, on lit :

Que contient ZOLTUM 20 mg, gélule gastro-résistante ?
Oméprazol 20 mg
Pour un comprimé à libération prolongée.
Les autres composants sont : Mannitol, hydroxypropylcellulose, cellulose microcristalline, lactose anhydre, laurylsulfate de sodium, phosphate disodique dihydraté, hypromellose, acide méthacrylique - copolymère d'acrylate d'éthyle (1 : 1) dispersion 30 %, macrogol (glycolpolyéthylène 400), stéarate de magnésium

Sur la notice du médicament B, on lit :

Que contient OMEPRAZOLE EG 10 mg, gélule gastro-résistante ?
Oméprazol 10,0 mg
Pour une gélule gastro-résistante.
Les autres composants sont :
Sphères de sucre (saccharose, amidon de maïs), lauryl sulfate de sodium, hydrogénophosphate de sodium anhydre, mannitol, hypromellose, macrogol 6000, talc, polysorbate 80, dioxyde de titane (E171), copolymère d'acide méthacrylique et d'acrylate d'éthyle (1 : 1).

Enfin, sur la notice du médicament C, on lit :

Que contient OMEPRAZOLE EG 20 mg, gélule gastro-résistante ?
Oméprazol 20,0 mg
Pour une gélule gastro-résistante.
Les autres composants sont :
Sphères de sucre (saccharose, amidon de maïs), lauryl sulfate de sodium, hydrogénophosphate de sodium anhydre, mannitol, hypromellose, macrogol 6000, talc, polysorbate 80, dioxyde de titane (E171), copolymère d'acide méthacrylique et d'acrylate d'éthyle (1 : 1).

Une boîte de 28 gélules du médicament A coûte 10,73 euros.

Une boîte de 14 gélules du médicament B coûte 3,27 euros.

Une boîte de 28 gélules du médicament C coûte 7,65 euros.

- 1 Ces médicaments ont-ils le même principe actif ?
- 2 Les médicaments A et B ont-ils les mêmes excipients ?
- 3 Les médicaments B et C ont-ils les mêmes excipients ?
- 4 Si la posologie prescrite par votre médecin est d'une gélule du médicament A tous les matins, combien de comprimés du médicament B faudrait-il prendre à la place chaque matin ?
- 5 L'un des deux médicaments A et C est un générique. Lequel ?
- 6 Le médicament B est-il générique ? Justifier votre réponse.
- 7 Comparer le prix de revient d'un milligramme de principe actif entre le médicament A et le médicament B. Comment interpréter le résultat ?

7 Synthèse de l'aspirine

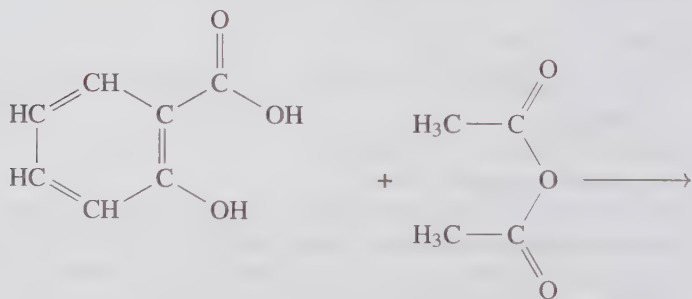
★★★

25 min

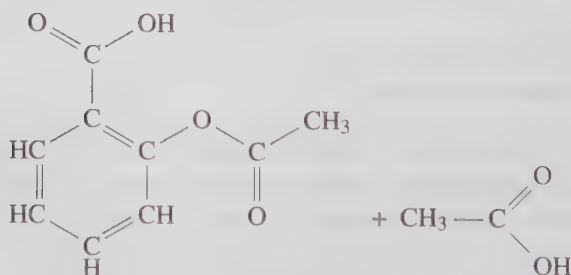
Corrigé
p. 397

Lycée du Parc, Lyon

- 1 On souhaite réaliser la synthèse de l'aspirine (acide acétylsalicylique) à partir d'acide salicylique et d'anhydride éthanóïque selon la réaction :

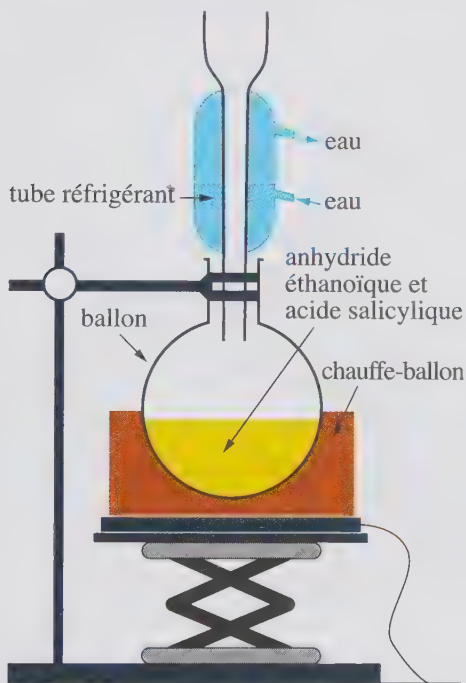


acide salicylique



aspirine

Pour ce faire, on introduit dans un ballon bien sec 15,0 mL d'anhydride éthanoïque et $m = 10,0$ g d'acide salicylique. On y ajoute cinq gouttes d'acide sulfurique. On adapte un tube réfrigérant à eau verticalement au-dessus du ballon et on met ce dernier dans un chauffe-ballon. On chauffe très doucement pendant 30 minutes.



- (a) Pour quelle raison la verrerie doit-elle être bien sèche ?
- (b) Quel est le rôle de l'acide sulfurique ?
- (c) Pourquoi doit-on chauffer le contenu du ballon ?
- (d) Comment s'appelle le type de montage montré sur la figure ci-dessus, et quel est son intérêt ?

2 À l'issue des 30 minutes, on refroidit le contenu du ballon (toujours muni du tube réfrigérant) sous de l'eau froide. On enlève ensuite le tube réfrigérant et on ajoute 150 mL d'eau très froide par petites quantités, en ajoutant vigoureusement. On observe la formation de cristaux. On filtre ceux-ci sur Büchner, puis on les sèche à l'étuve. À la balance, on détermine la masse de ces cristaux. On obtient $m' = 9,7$ g. On utilise ensuite un banc Kofler pour mesurer la température de fusion ϑ_f des cristaux obtenus. On obtient $\vartheta_f = 137$ °C.

- (a) Pourquoi garde-t-on le tube réfrigérant lorsque l'on refroidit le ballon ?
- (b) Quelle est la nature des cristaux blancs obtenus ?
- (c) Pourquoi ajoute-t-on de l'eau très froide ? Comment s'appelle cette technique et quel est son intérêt ?
- (d) Déterminer les masses molaires de l'acide salicylique, de l'anhydride éthanoïque et de l'acide acétylsalicylique.
- (e) Déterminer les quantités de matière des réactifs dans le ballon. Y a-t-il un réactif en excès ?
- (f) Déterminer la quantité de matière du produit correspondant aux cristaux blanc.
- (g) Quel est le rendement de cette synthèse ?

Données : • Densité de l'anhydride éthanoïque : 1,082

- Température de fusion de l'acide salicylique : 159 °C
- Température de fusion de l'acide acétylsalicylique : 135 – 140 °C
- Masse molaire du carbone : $M(\text{C}) = 12 \text{ g.mol}^{-1}$
- Masse molaire de l'hydrogène : $M(\text{H}) = 1 \text{ g.mol}^{-1}$
- Masse molaire de l'oxygène : $M(\text{O}) = 16 \text{ g.mol}^{-1}$

1 acm Testez vos connaissances

➔ **Énoncé**
p. 383

- 1 Réponse **b** : *Faux*. L'excipient n'a rien à voir avec les propriétés thérapeutiques (et donc les indications thérapeutiques) d'un médicament, qui sont celles du principe actif. Il est parfaitement concevable que deux médicaments n'ayant rien à voir, avec des indications thérapeutiques totalement différentes, aient le même excipient.
- 2 (a) Réponse **b**.
(b) Réponse **a**.
(c) Réponse **a**. La concentration massique du paracétamol dans le sirop A est :

$$c_A = \frac{3}{0,1} = 30 \text{ g.L}^{-1}$$

tandis que celle du sirop B est :

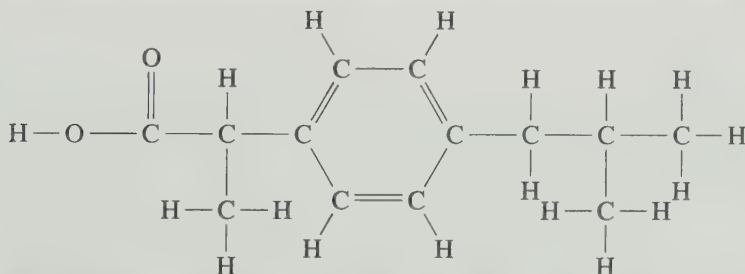
$$c_B = \frac{5}{0,2} = 25 \text{ g.L}^{-1}$$

2 Étude de l'ibuprofène

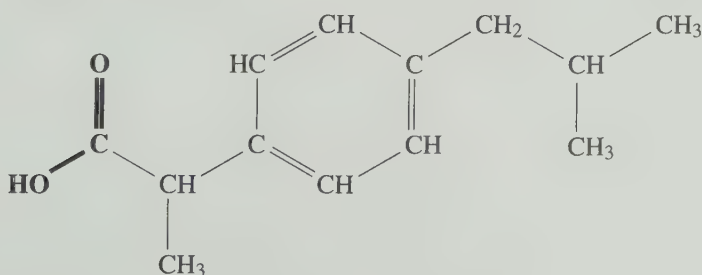
➔ **Énoncé**
p. 383

Lycée Condorcet, Paris

- 1 Les indications données dans l'énoncé nous permettent d'identifier les sphères noires comme des atomes de carbone, les sphères gris clair comme des atomes d'hydrogène et les sphères rouges comme des atomes d'oxygène. Nous pouvons en déduire la formule développée suivante :



- 2 Cette molécule appartient à la famille des acides carboxyliques. Nous faisons apparaître en gras son groupe caractéristique sur la formule semi-développée ci-dessous.

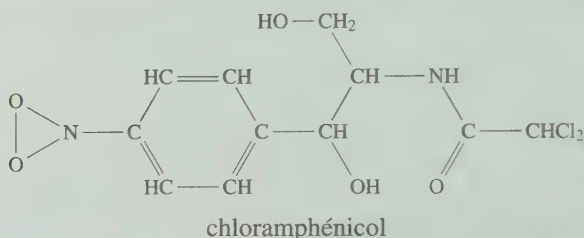


3 Principes actifs

Enoncé
p. 384

Lycée Auguste Renoir, Limoges

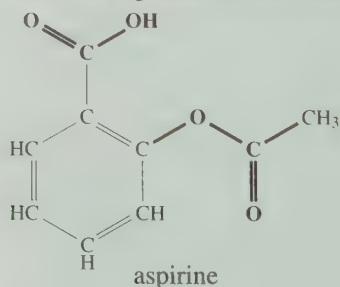
- 1 Les atomes représentés en vert sur le modèle moléculaire éclaté de la molécule D sont monovalents : ils ne contractent qu'une liaison covalente, avec l'atome de carbone voisin. Ce ne sont pas des atomes d'hydrogène (représentés en gris clair) donc ce sont des atomes appartenant à la famille des halogènes. Par ailleurs, l'énoncé indique la présence d'halogénures (chlorures) dans la molécule de chloramphénicol. Aucune autre molécule ne possède de groupement halogénure. La molécule D est donc la molécule de chloramphénicol.
- 2 La formule semi-développée de la molécule D est la suivante :



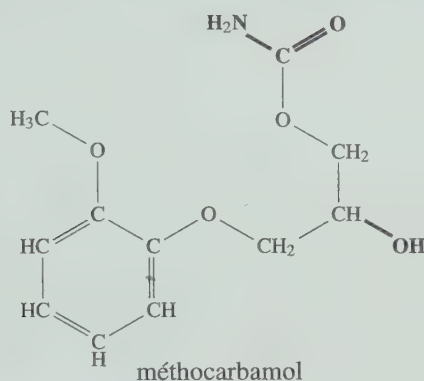
MÉTHODE

On prend garde à respecter la valence de chacun des atomes. Cela est important car certains atomes ou liaisons sont à peine visibles sur le modèle moléculaire éclaté, et les considérations de valence permettent d'éviter de possibles ambiguïtés.

- 3 Parmi les molécules proposées, une seule possède deux cycles accolés : il s'agit de la molécule A, qui est par conséquent une molécule de caféine. Il nous reste donc à identifier le méthocarbamol et l'aspirine parmi les molécules B et C. Le texte mentionne la présence d'un groupement amide (donc au moins d'un atome d'azote) dans la molécule de méthocarbamol. La molécule B ne contient pas d'atome d'azote, donc par élimination nous pouvons simplement conclure que la molécule C est la molécule de méthocarbamol et la molécule B la molécule d'aspirine.
- 4 Nous faisons apparaître en gras les groupes caractéristiques de l'aspirine ci-dessous (carboxyle en haut à gauche, et ester au-dessous à droite) :



La formule semi-développée du méthocarbamol, ci-dessous, fait apparaître le groupe caractéristique amide (en haut) et le groupe hydroxyle (à droite) :



Composition d'un médicament

➔ Enoncé
p. 385

Lycée Léonard de Vinci, Saint-Germain-en-Laye

- 1 Les échantillons qui donnent lieu à une seule tache (A, B et D) sont ceux d'une espèce chimique pure, et correspondent donc à (pour l'instant dans le désordre) la caféine, le paracétamol et l'aspirine.

⚠ ATTENTION

La tache sur la ligne de dépôt ne compte pas. On s'intéresse exclusivement à la partie qui a migré.

Puisque l'espèce la mieux entraînée est l'aspirine, c'est celle des trois qui est le plus proche du front du solvant, donc c'est l'échantillon A. Pour une raison similaire, l'échantillon B est celui de paracétamol, et donc celui de D est l'échantillon de caféine.

- 2 Le médicament (colonne C) contient du paracétamol et de la caféine, puisqu'il existe des taches aux mêmes niveaux que les produits témoins, mais pas d'aspirine.

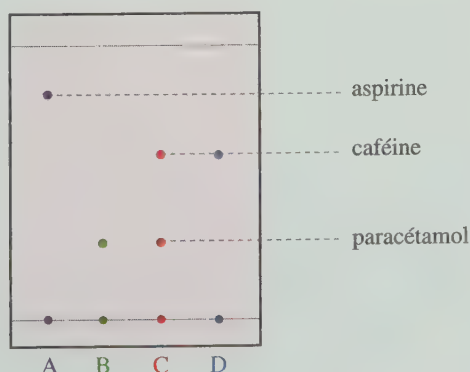


Figure 17.2 – Identification des espèces sur le chromatogramme.

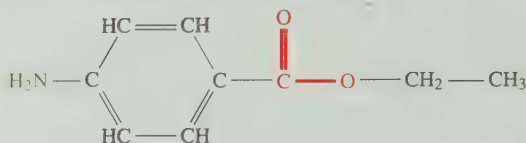
5

Identification de principes actifs

Enoncé
p. 386

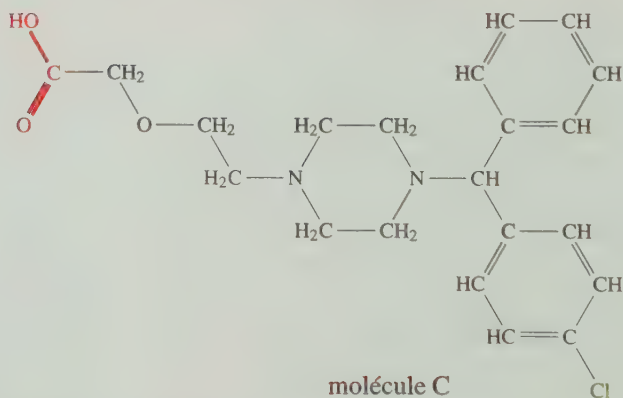
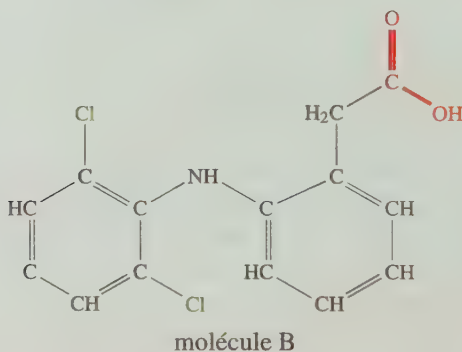
Lycée Stanislas, Paris

- 1 La molécule A a pour formule semi-développée :



où l'on a, en prévision de la suite, indiqué en vert un groupe caractéristique « amine » et en rouge un groupe caractéristique « ester ».

- 2 Les molécules B et C portent toutes deux des atomes de chlore, et ont toutes deux un groupe caractéristique « acide carboxylique ». Nous les faisons apparaître, respectivement en vert et en rouge, sur les formules semi-développées ci-dessous.



Nous pouvons donc inférer des données de l'énoncé que le diclofénac et la cétirizine correspondent aux molécules B et C (pas nécessairement dans cet ordre). Par élimination la benzocaïne et l'orphénadrine correspondent aux molécules A et D (pas nécessairement dans cet ordre). Nous avons vu à la question précédente que la molécule A possède un groupe

caractéristique « ester », donc il ne peut s'agir de l'ophénadrine : c'est nécessairement la benzocaïne, et par conséquent la molécule D correspond à l'ophénadrine. Il nous reste à départager les molécules B et C, en utilisant l'information sur les masses molaires. La formule brute de la molécule B est $C_{14}H_{11}Cl_2NO_2$, tandis que celle de la molécule C est $C_{21}H_{25}ClN_2O_3$.

En désignant respectivement par M_B et M_C les masses molaires moléculaires de ces deux molécules, nous avons :

$$\begin{aligned} M_C - M_B &= 7M(C) + 14M(H) + M(N) + M(O) - M(Cl) \\ &> 7M(C) - M(Cl) = 84 - 35,5 > 0 \end{aligned}$$

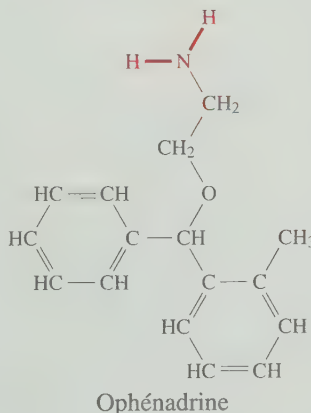
Bien que les masses molaires des atomes d'hydrogène, d'oxygène et d'azote ne soient pas fournies par l'énoncé, les données sont suffisantes pour s'assurer que la masse molaire de la molécule C est supérieure à celle de la molécule B. La molécule A a pour formule brute $C_9H_{11}NO_2$, donc on voit directement que sa masse molaire moléculaire est inférieure à celle de la molécule B, puisque les différents atomes représentés dans la molécule A (C, H, N et O) sont moins nombreux dans cette molécule que dans la molécule B (à l'exception de l'hydrogène, qui est présent onze fois dans les deux molécules). Enfin, la formule brute de la molécule D est $C_{18}H_{23}NO$. Là-encore, nous voyons directement que la masse molaire moléculaire de cette molécule est inférieure à celle de la molécule C.

Cette dernière est donc la molécule ayant la plus grande masse molaire parmi les quatre présentées, donc ce n'est pas la molécule de diclofénac. Par élimination celle-ci est donc la molécule B, tandis que la molécule C est une molécule de cétirizine.

En résumé nous avons :

Molécule	Nom
A	Benzocaïne
B	Diclofénac
C	Cétirizine
D	Ophénadrine

- 3** Nous avons vu que la molécule de benzocaïne possède un groupe caractéristique « amine ». L'autre molécule qui possède un tel groupe est la molécule d'ophénadrine. Nous faisons apparaître ce groupe sur la formule semi-développée ci-contre.



6 Princesps et génériques

Enoncé
p 387

Lycée Albert Sorel, Honfleur

- 1 Oui, ces médicaments ont tous pour principe actif l'oméprazole.
- 2 Non, les excipients (qui apparaissent à la suite de la mention « autres composants ») sont différents, même si certains (par exemple le mannitol) apparaissent dans les deux cas.
- 3 Oui, les excipients sont exactement les mêmes.
- 4 Une gélule du médicament A contient deux fois plus de principe actif qu'une gélule du médicament B. Il faut donc prendre deux gélules du médicament B.
- 5 On peut comparer le prix des boîtes de 28 gélules du médicament A et C. Elles correspondent exactement à la même quantité de principe actif, puisque chaque gélule comporte 20 mg d'oméprazole. Le médicament A a un coût plus élevé que le médicament C, ce qui indique que, entre les deux, c'est le médicament C qui est le générique, l'autre étant un médicament princeps.
- 6 Le médicament B a mêmes excipients et même nom (Omeprazol EG) que le médicament C. Il est donc fabriqué par le même laboratoire, et est aussi un médicament générique.
- 7 Dans le médicament A, nous avons une masse m_A de principe actif, donnée par :

$$m_A = 28 \times 20 = 560 \text{ mg}$$

ce qui donne le prix de revient du milligramme d'oméprazol suivant :

$$c_A = \frac{10,73}{560} = 0,0192 \text{ euro/mg}$$

Dans le médicament B, nous avons une masse m_B de principe actif :

$$m_B = 14 \times 10 = 140 \text{ mg.}$$

qui donne le prix de revient suivant :

$$c_B = \frac{3,27}{140} = 0,0233 \text{ euro/mg}$$

Le prix de revient du milligramme de principe actif est plus important pour le médicament B que pour le médicament A. Cela peut paraître surprenant au premier abord, étant donné que c'est le médicament B qui est un médicament générique. Toutefois, la formulation est différente : les gélules du médicament B ne contiennent que 10 mg de principe actif. En outre une boîte du médicament B ne contient que 14 gélules. La comparaison des prix entre un médicament princeps et un médicament générique ne peut se faire que pour la même formulation, et pour une même quantité de médicament, comme c'était le cas pour les médicaments A et C.

À formulation et quantité de principe actif égale, les médicaments princeps sont en général plus chers que les médicaments génériques. Cela permet aux laboratoires pharmaceutiques qui les développent de rentabiliser leur activité de recherche et développement.

7 Synthèse de l'aspirine

→ Énoncé
p. 388

Lycée du Parc, Lyon

- 1
 - (a) La verrerie doit être bien sèche sans quoi l'anhydride éthanóique réagirait avec l'eau pour former de l'acide éthanóique.
 - (b) Le rôle de l'acide sulfurique est d'accélérer la réaction.
 - (c) De la même manière, on chauffe (modérément) le contenu du ballon pour accélérer la réaction.
 - (d) Le type de montage utilisé s'appelle un montage de chauffage à reflux. Les vapeurs produites par le chauffage se condensent sur les parois du tube réfrigérant, et le liquide résultant de cette condensation retombe dans le milieu réactionnel. Cela évite de perdre des réactifs par évaporation.
- 2
 - (a) On doit garder le tube réfrigérant tant que le milieu réactionnel n'est pas refroidi pour éviter que des vapeurs issues de celui-ci ne se dispersent dans la pièce.
 - (b) La température de fusion des cristaux blancs est dans l'intervalle indiqué dans les données de l'énoncé pour l'acide acétylsalicylique (ou aspirine), et n'est pas compatible avec la température de fusion de l'acide salicylique. Il s'agit donc de cristaux d'aspirine.
 - (c) On ajoute de l'eau très froide pour faire cristalliser l'aspirine. Il s'agit de la technique de recristallisation. Le mélange réactionnel contient de l'aspirine et des impuretés. L'aspirine est très peu soluble dans l'eau très froide, tandis que les impuretés sont solubles à chaud et à froid. L'intérêt de la technique de recristallisation est donc d'obtenir de l'aspirine purifiée.
 - (d) Nous commençons par déterminer leur formules brutes. Celle de l'acide salicylique est $C_7O_3H_6$, celle de l'anhydride éthanóique est $C_4O_3H_6$ et celle de l'aspirine est $C_9O_4H_8$.
On en déduit les masses molaires moléculaires :

$$M_{\text{acide salicylique}} = 7 \times 12 + 3 \times 16 + 6 = 138 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M_{\text{anhydride éthanóique}} = 4 \times 12 + 3 \times 16 + 6 = 102 \text{ g.mol}^{-1}$$

$$M_{\text{aspirine}} = 9 \times 12 + 4 \times 16 + 8 = 180 \text{ g.mol}^{-1}$$

- (e) Nous en déduisons la quantité de matière en acide salicylique à l'état initial :

$$n_{\text{acide salicylique}} = \frac{m}{M_{\text{acide salicylique}}} = \frac{10,0}{138} = 7,25 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Il nous faut déterminer la masse m_0 d'anhydride éthanoïque initialement présent dans le milieu réactionnel. On utilise la relation :

$$m_0 = d \times v$$

avec v en mL et m en gramme. Nous avons $v = 15$ mL donc :

$$m_0 = 1,082 \times 15 = 16,2 \text{ g}$$

On en déduit la quantité de matière n_0 d'anhydride éthanoïque à l'état initial :

$$n_0 = \frac{m_0}{M_{\text{anhydride éthanoïque}}} = \frac{16,2}{102} = 1,59 \times 10^{-1} \text{ mol}$$

L'équation-bilan de la réaction donnée dans l'énoncé est correctement équilibrée. Les coefficients stœchiométriques de l'acide salicylique et de l'anhydride éthanoïque sont tous deux égaux à un. Si les proportions du mélange réactionnel initial étaient stœchiométriques, les quantités de matières des deux réactifs devraient être égales. Ce n'est pas le cas : nous avons $n_0 > n$, donc l'anhydride éthanoïque est en excès.

(f) De la même manière que précédemment, nous avons :

$$n_{\text{aspirine}} = \frac{m'}{M_{\text{aspirine}}} = \frac{9,7}{180} = 5,4 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

(g) Si le rendement de la synthèse était de 100 %, nous aurions dû obtenir une quantité de matière en aspirine égale à celle initialement présente en acide salicylique. Ce n'est pas le cas, la quantité de matière obtenue est moindre.

Le rendement r de la synthèse est :

$$r = \frac{n_{\text{aspirine}}}{n_{\text{acide salicylique}}} = \frac{5,4 \times 10^{-2}}{7,25 \times 10^{-2}} = 0,74$$

Le rendement de la synthèse est de 74 %. Nous gardons ici deux chiffres significatifs compte-tenu de la précision des données de l'énoncé.

Index

- acide carboxylique 300, 301
 acide salicylique 389
 alcalins 262, 266
 alcanes 298
 alcènes 299
 alcool 300
 alcynes 299
 ampoule à décanter 230
 angle limite 58, 66
 anhydride éthanoïque 389
 anion 263, 268
 année-lumière 1, 7, 9
 arôme 309
 aspartame 350
 aspirine 348, 379, 388
 atmosphère 191
 atome 252
 atomicité 325
 azote 251, 263, 283
 banc Kofler 233, 235, 389
 baromètre 192
 baryum 98, 233, 242
 base de temps 41
 benzène 299
 Bohr (modèle de) 252, 256
 caféine 350
 calculatrice 2, 59
 carbone 251, 279, 280, 283
 cation 263
 célérité 6, 36
 Celsius 190
 cétone 300
 charge électrique 252, 364
 chiffres significatifs 5
 chromatographie 229, 234, 385
 chronophotographie 118, 153, 155
 classification périodique 262
 colorant 229
 combustion 367
 concentration
 massique 343, 346
 molaire 341, 342, 346
 condition d'équilibre 145
 configuration électronique ... 261, 263, 265,
 267
 constante d'Avogadro 318
 couche
 électronique 261
 externe 264
 Coulomb 252
 cyclanes voir cycloalcanes
 cycle aromatique 299
 cycloalcanes 298
 cyclohexane 239
 DCI 379, 383
 décantation 230
 densité 204
 densité 319, 323
 diiode 345–347
 dilution (facteur de) 344
 dioptré 56, 57, 60, 64
 dispersion 56, 66
 dissolution 341
 distance 179
 divalent 280
 dynamomètre 142, 148

écho	38	glucose	346, 348
échographie	40, 42, 45	gravitation universelle	172
électrocardioscope	36	groupes caractéristiques	300
électron	252, 255	halogènes	262, 266
énergie cinétique	145	hélium	251
énergie cinétique	141	hertz	34
entité élémentaire	318	huile essentielle	238
équation-bilan	363, 366, 367, 369	hydrodistillation	231, 235, 239
équilibre	150	hydrogène	98, 251, 279, 283
thermique	206	hydroxyde	233
espèce moléculaire	342	hydroxyle	300
état	361	indice de réfraction	56, 64
final	362	infrarouges	38
initial	362	intensité de la pesanteur	174, 176
éthanol	288	interaction gravitationnelle ..	171, 172, 176, 178, 179
excès	365, 367, 370, 390	ion	
excipient	377–379, 383	monoatomique	254, 264
fer	98	tests d'identification	232
fibre optique	61, 67	isomère	283, 287
fibroscope	70	isotonique	349
filtration sur Büchner	231	isotope	253
force	141, 142, 145, 148	laser	56
gravitationnelle	173, 178	liaison	279, 362, 377
pressante	191, 198	double	280, 289
formulation	379	simple	280
formule		triple	281
brute	282, 321, 377	loi de Boyle-Mariotte	193
développée ...	282, 285–287, 321, 377	loi fondamentale de l'hydrostatique	195
semi-développée ...	282, 297, 299, 306	lois de Snell-Descartes	
fréquence	34	réflexion	57
galaxie	6, 13	réfraction	58
gaz		longueur d'onde	56
noble	262, 264, 266, 280	lumière blanche	56, 68, 69
parfait	192	lumière visible	94
rare	262	Lune	12
générique	379, 387		

manomètre	191	paracétamol	377, 379, 381
masse	143, 171, 173	parsec	10, 13, 14
molaire	318, 321, 324, 377	pascal	191
volumique	195, 319	période	34, 262, 265, 266
médicament	378	piston	200, 209
Mendeleïev	262, 399	plan d'incidence	57
mercure	320	plongeur	202, 208
millimètre de	191	poids	146, 171, 173
méthane	280	polymère	307
microphone	36*	précipité	233, 364
mirage	64	pression	189
mobile autoporteur	143, 153, 155, 199	atmosphérique	199
modèle moléculaire	283, 377	princeps	387
mole	317	principe	
monomère	307	actif	377-379
monovalent	280	d'inertie	150, 199
néon	251	de l'action-réaction	145, 172
neutre	253	prisme	61, 63, 65, 68, 82
neutron	253, 255	produit	362
Newton	142	proton	252, 255
nombre		PSI	200
d'Avogadro	318	puissances de dix	4
de masse	253	préfixes	3
normale	57	QSP	379, 383
notation scientifique	2, 11	quantité de matière	317, 377
noyau	255	quasar	11
nucléon	253	radiation	
numéro atomique	253	monochromatique	56
onde	36	polychromatique	56
électromagnétique	37, 94	rapport frontal	234
radio	38, 45	rayon	55
sonore	37	incident	57
ordre de grandeur	1, 6	réfléchi	56, 57, 71
oscilloscope	35, 41-43	réfracté	56, 58, 71
à mémoire	44	réactif	362
oxygène	251, 279, 283	réaction chimique	361

référentiel	115, 116	spectroscopie	98
géocentrique	116	stœchiométrique	363, 368
galiléen	144	supernova	13, 16
héliocentrique	116	symétrie sphérique	173
terrestre	116	système chimique	361
réflexion	55, 57	température	189, 190
totale	58, 62, 65	tension	33
réfraction	55	corde	146
réfrigérant	231	périodique	35
règle		variable	35, 43
de l'octet	264	tétravalent	280
du duet	264	trajectoire	115
rendement	390	transformation chimique	361, 362, 366
saccharose	345, 349	trivalent	280
satellite	171, 175	tube réfrigérant	239
saturation	342, 345	ultrason	43
signal périodique	34	uniforme	118
silicium	252	Univers	7
Soleil	6, 9, 95	observable	12
solubilité	232	valence	280, 282
soluté	341	vitesse	117
solution aqueuse	342	de la lumière	6, 11, 61
solvant	342	du son	37, 43, 44
son	<i>voir</i> onde sonore	initiale	175
spectre	94	instantanée	117
d'émission	97	moyenne	117
d'absorption	97	volume molaire	319, 327

Achevé d'imprimer en France par Loire Offset Titoulet
Dépôt légal n° 1022991 - Juin 2017

Ordres de grandeur et puissances de 10

• Ordres de grandeur

Puissance de 10	Préfixe	Symbole	Puissance de 10	Préfixe	Symbole
1	unité		$10^{-1} = 0,1$	déci-	d
$10^1 = 10$	déca-	da	$10^{-2} = 0,01$	centi-	c
$10^2 = 100$	hecto-	h	$10^{-3} = 0,001$	milli-	m
$10^3 = 1\ 000$	kilo-	k	10^{-6}	micro-	μ
10^6	méga-	M	10^{-9}	nano-	n
10^9	giga-	G	10^{-12}	pico-	p
10^{12}	téra-	T	10^{-15}	femto-	f
10^{15}	péta-	P	10^{-18}	atto-	a
10^{18}	exa-	E			

• Notation scientifique sur une calculatrice

Sur un écran de calculatrice scientifique, la notation **2.19E-4** signifie $2,19 \times 10^{-4}$.

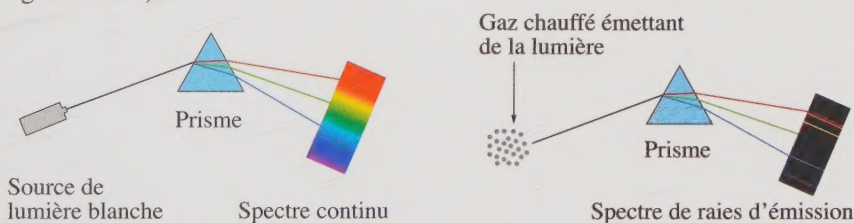
• Règles de calcul sur les puissances de 10

$10^a \times 10^b = 10^{a+b}$	$\frac{10^a}{10^b} = 10^{a-b}$	$\frac{1}{10^a} = 10^{-a}$
-------------------------------	--------------------------------	----------------------------

Spectres lumineux

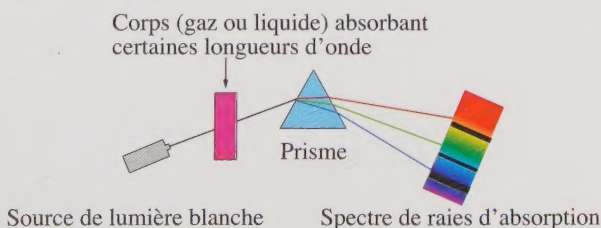
• Spectre d'émission

C'est le spectre obtenu en dispersant la lumière issue d'une source (lumière blanche ou gaz chauffé).



• Spectre d'absorption

C'est le spectre obtenu en dispersant de la lumière ayant traversé un corps (liquide, filtre, gaz...) susceptible d'absorber certaines de ses couleurs.



• Spectre d'une étoile

Les spectres de raies donnent des informations sur la composition de la source de lumière (émission) ou sur celle de la substance traversée par la lumière (absorption). On peut ainsi connaître la composition d'une étoile et de son atmosphère.

INTERROS des LYCÉES



✓ Les vrais exos donnés par les profs

- Des centaines d'exercices recueillis dans les lycées de France.
- Des énoncés variés, de difficulté progressive, réellement posés par de vrais professeurs dans de vraies classes.
- Tous les corrigés détaillés.

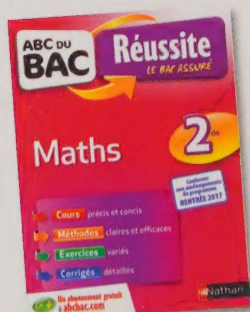


✓ Pour un entraînement efficace en physique-chimie

- Une organisation par thèmes conforme au programme.
- Des rappels de cours synthétiques.
- Des QCM de vérification des connaissances.
- Un minutage pour chaque exercice.
- Des conseils méthodologiques.

Toute une gamme Nathan pour réviser utile

Réussir son année



→ Réussite
Le Bac assuré

Réviser rapidement



→ Mes fiches
Pour réviser vite et bien

Pour être accompagné
en toute sérénité



PHYSIQUE-CHIMIE 2E/1e
PRIX ÉDITEUR 14,20€



0147 001500 EA605684 2E 3701 GRP 0147/8943 0703L1 806 4



www.abcbac.com

Nathan

