

INTERROS des LYCÉES

Collection dirigée par Éric MAURETTE

physique chimie



Frédéric MASSET

 **Nathan**

Remerciements

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

Illustrations : Prisca Baverey
Coordination éditoriale : François Déliac
Conception couverture : Simon Geliot

Votre avis nous intéresse : contact@prepamath.fr

© PREPAMATH Éditions 2023
© Éditions NATHAN 2023 - ISBN 9782095023386

Avant-propos

La nouvelle édition de cet ouvrage, complètement revue et corrigée, est conforme au nouveau programme de Physique-Chimie de la classe de Seconde, qui entre en vigueur à la rentrée 2019. Celui-ci est structuré en quatre thèmes, dont trois sont dans la continuité de ce que vous avez déjà étudié au collège : « Constitution et transformations de la matière », « Mouvement et interactions » et « Ondes et signaux ». Le quatrième, « L'énergie : conversions et transferts », est abordé dans le cadre de l'étude des transformations de la matière.

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.
- Des questionnaires à choix multiples (QCM) ou des vrai-faux (V/F) pour vous assurer d'avoir la maîtrise des concepts fondamentaux du chapitre.
- Des exercices de tous les types que l'on pourra rencontrer en classe de Seconde, et qui ont tous été réellement posés en lycée, sauf pour les parties nouvelles du programme.
- 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 corrigés des exercices, dont certains sont beaucoup plus détaillés que ce qui est normalement demandé à un élève de Seconde pour un devoir en classe. Ceci a pour but de vous aider à garder les idées claires sur les notions fondamentales utilisées.

Une grande nouveauté de cette édition est l'apparition de compléments numériques vidéo, audio, ou autres ressources Internet. Grâce à l'application « Nathan live », des renvois vers ces ressources numériques vous aideront de manière vivante à préciser certains points du cours, à mieux comprendre la résolution d'exercices importants, et à visualiser des expériences.

Vous pouvez aussi télécharger les programmes Python contenus dans cet ouvrage en allant sur le lien suivant :

<http://www.prepamath.fr/IL2PC>.

Notons que les programmes Python proposés dans cet ouvrage sont en Python 2.7 standard. Il ne requièrent pas l'installation d'edupython, et ne font appel qu'aux deux bibliothèques suivantes (d'un usage très répandu) : numpy (pour les calculs scientifiques) et matplotlib (pour les graphes).

N'hésitez pas à nous faire part de vos remarques ou suggestions en nous contactant par mail à l'adresse contact@prepamath.fr.

Très bon entraînement à vous.

L'auteur

Table des matières

Chap 1	La loi des nœuds	1
	● Cours	1
	● Interros	6
	● Corrigés	9
Chap 2	Loi des mailles	15
	● Cours	15
	● Interros	21
	● Corrigés	25
Chap 3	Les dipôles électriques	29
	● Cours	29
	● Interros	35
	● Corrigés	41
Chap 4	Signaux périodiques et sons	51
	● Cours	51
	● Interros	61
	● Corrigés	69
Chap 5	Réflexion et réfraction de la lumière	75
	● Cours	75
	● Interros	79
	● Corrigés	87
Chap 6	Spectres lumineux	99
	● Cours	99
	● Interros	105
	● Corrigés	109

Chap 7	Les lentilles minces convergentes	113
	● Cours	113
	● Interros	123
	● Corrigés	126
Chap 8	Décrire un mouvement	133
	● Cours	133
	● Interros	139
	● Corrigés	148
Chap 9	Forces et principe d'inertie	161
	● Cours	161
	● Interros	167
	● Corrigés	175
Chap 10	L'interaction gravitationnelle	187
	● Cours	187
	● Interros	191
	● Corrigés	197
Chap 11	L'atome et son noyau	207
	● Cours	207
	● Interros	210
	● Corrigés	213
Chap 12	Le cortège électronique	217
	● Cours	217
	● Interros	222
	● Corrigés	226
Chap 13	Stabilité chimique : ions et molécules	233
	● Cours	233
	● Interros	239
	● Corrigés	242

Chap	14	Quantité de matière La mole	247
		● Cours	247
		● Interros	250
		● Corrigés	252
Chap	15	Les solutions aqueuses	255
		● Cours	255
		● Interros	258
		● Corrigés	260
Chap	16	Les transformations physiques	263
		● Cours	263
		● Interros	268
		● Corrigés	270
Chap	17	Les réactions chimiques	273
		● Cours	273
		● Interros	278
		● Corrigés	281
Chap	18	Identification et synthèse d'espèces chimiques	289
		● Cours	289
		● Interros	297
		● Corrigés	303
Chap	19	Transformations nucléaires	309
		● Cours	309
		● Interros	314
		● Corrigés	316
Chap	20	Mesure et incertitudes	319
		● Cours	319
		● Interros	328
		● Corrigés	331
Annexes		Classification périodique	335
		Index	337
		Liste des vidéos	341

Nathan Live

Accédez aux compléments numériques de cet ouvrage (vidéos, audios, liens Internet) sur votre smartphone ou votre tablette avec



- 1 | **Téléchargez** l'application gratuite Nathan Live disponible dans tous les stores sur votre smartphone ou votre tablette (Appstore, GooglePlay, Windows Store).



- 2 | **Scannez** les pages de votre livre où le logo Nathan Live apparaît

- 3 | **Consultez** les ressources !



Logo Nathan Live indiquant que la page contient des ressources



Vous consultez directement la ressource sur votre smartphone ou votre tablette

Pour télécharger les programmes contenus dans cet ouvrage :

<http://www.prepamath.fr/ILT2PC>

Méthodes de travail

Tous les conseils qui suivent sont ceux utilisés par un grand nombre de majors (sortis premiers) de Polytechnique ou de l'ÉNA, 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, 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 notion, 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 explications et notions importantes. 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.

Chapitre

1

La loi des nœuds

Plan du chapitre

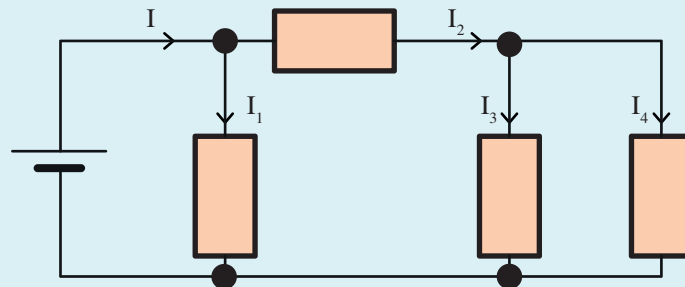
1. Introduction
2. Généralités sur le courant électrique
3. Définitions
4. Loi des nœuds

1 Introduction

Exercice type

Lycée Gustave Monod, Enghien-les-Bains

Déterminer les intensités des courants I_2 et I_4 dans le circuit ci-après, sachant que l'on a : $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_3 = 2 \text{ A}$ et $I = 5 \text{ A}$.



Voir corrigé page 5

Cet exercice fait appel à la notion de courant électrique et d'intensité. Pour le résoudre il faut connaître la loi des nœuds à laquelle obéissent les intensités dans tout circuit électrique.

2 Généralités sur le courant électrique

Ce qui caractérise un corps conducteur du courant électrique est l'existence de porteurs de charge mobiles, susceptibles de se déplacer collectivement, donnant ainsi naissance à un courant électrique.

Exemples

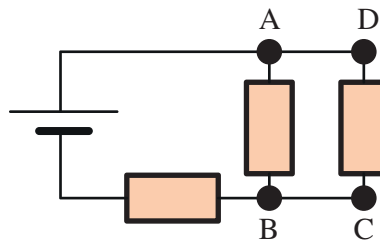
- Dans un métal, il existe des électrons pouvant se déplacer librement dans tout le volume du métal. Ces électrons ont une charge électrique (négative). Un métal est donc un conducteur.
- Un électrolyte est une solution contenant des ions. Ces ions peuvent se déplacer librement dans l'électrolyte. Un électrolyte conduit donc aussi le courant.

3 Définitions

Définition 1

On appelle nœud d'un circuit électrique tout point de ce circuit dont partent au moins trois conducteurs.

Exemple : dans le circuit suivant :



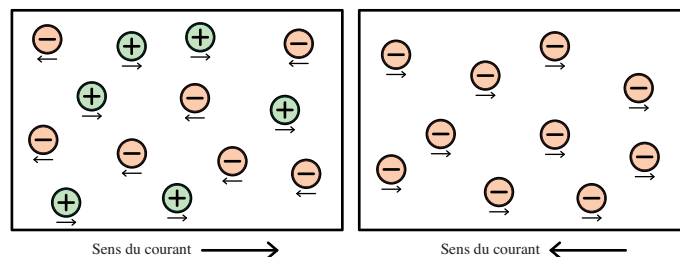
les points A et B sont des nœuds, les points C et D n'en sont pas.

Définition 2

On appelle branche d'un circuit toute portion de circuit située entre deux nœuds consécutifs.

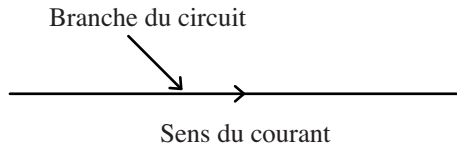
3.1 Sens du courant électrique

On dit que le sens du courant est celui du mouvement des charges positives. Si les porteurs de charge du conducteur ont exclusivement des charges négatives, le sens du courant est le sens opposé à celui de ces porteurs de charge.



LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

Lorsqu'on veut indiquer le sens du courant dans une branche de circuit, on dessine une flèche sur cette branche, comme représenté ci-dessous.



3.2 Intensité du courant électrique

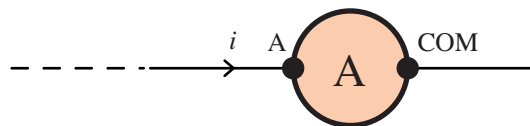
L'intensité d'un courant électrique est la quantité de charge qui traverse un conducteur par unité de temps. C'est en quelque sorte le « débit » électrique traversant un conducteur.

À RETENIR

Dans le Système International, l'unité d'intensité est l'ampère, de symbole A.

L'intensité est souvent désignée par le symbole i ou I , que l'on reporte sur la figure à côté de la flèche précisant le sens du courant, comme cela est fait dans l'énoncé de l'exercice type.

L'intensité électrique se mesure avec un ampèremètre. Un ampèremètre se branche toujours en série sur la branche de circuit où l'on souhaite mesurer l'intensité. Dans la pratique, les ampèremètres sont souvent des multimètres numériques ayant, entre autre, une fonction ampèremètre. Pour utiliser un multimètre en ampèremètre, on branche la borne COM du côté de la borne négative du générateur, et la borne marquée mA (ou A, ou 10A) du côté de la borne positive.



Branche où l'on souhaite mesurer i

Généralement, un ampèremètre comporte différents calibres. Le calibre correspond à la valeur maximale que l'ampèremètre peut mesurer. Pour une mesure précise, il faut adopter le calibre le plus petit qui soit supérieur à l'intensité circulant dans le circuit. Lorsqu'on n'a *a priori* aucune idée de celle-ci, il faut commencer les mesures par le plus grand calibre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Loi des nœuds

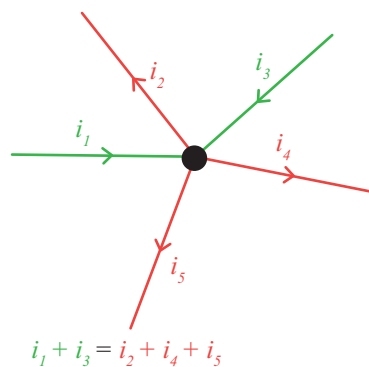
Dans un circuit simple, c'est-à-dire ne comportant qu'une seule branche, l'intensité est partout la même.

Si le circuit comporte plusieurs branches, connectées par des nœuds, les intensités des courants circulant dans chaque branche obéissent à la loi des nœuds.

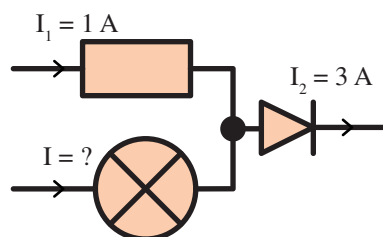
À RETENIR

La somme des intensités des courants qui arrivent à un nœud est égale à la somme des intensités des courants qui en repartent.

Sur la figure suivante, on représente en vert les branches où le courant se dirige vers le nœud, et en rouge celles où le courant part du nœud.



Sur la figure suivante, on a représenté quelques objets sur le circuit dont l'appellation précise et la fonction seront vues ultérieurement. On se pose la question de savoir ce que vaut I .



La loi des nœuds s'écrit ici :

$$I + I_1 = I_2$$

donc :

$$I = I_2 - I_1 = 3 - 1 = 2 \text{ A.}$$

LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

→ Solution de l'exercice type

Lycée Gustave Monod, Enghien-les-Bains

La loi des nœuds énoncée à la section précédente nous permet de résoudre l'exercice type. Il faut pour connaître les valeurs des intensités I_2 et I_4 appliquer la loi des nœuds aux nœuds respectivement gauche et droit de la branche supérieure du circuit.

Au nœud gauche, la loi des nœuds s'écrit :

$$I \text{ (le courant qui arrive)} = I_1 + I_2 \text{ (les courants qui repartent)}$$

En faisant l'application numérique, on obtient :

$$5 = 1 + I_2$$

soit : $I_2 = 4 \text{ A}$.

D'une manière analogue, au nœud droit, la loi des nœuds s'écrit :

$$I_2 \text{ (le courant qui arrive)} = I_3 + I_4 \text{ (les courants qui repartent)}$$

ce qui donne, tous calculs faits : $I_4 = 4 - 2 = 2 \text{ A}$.

Voir énoncé page 1

COURS

INTERROS

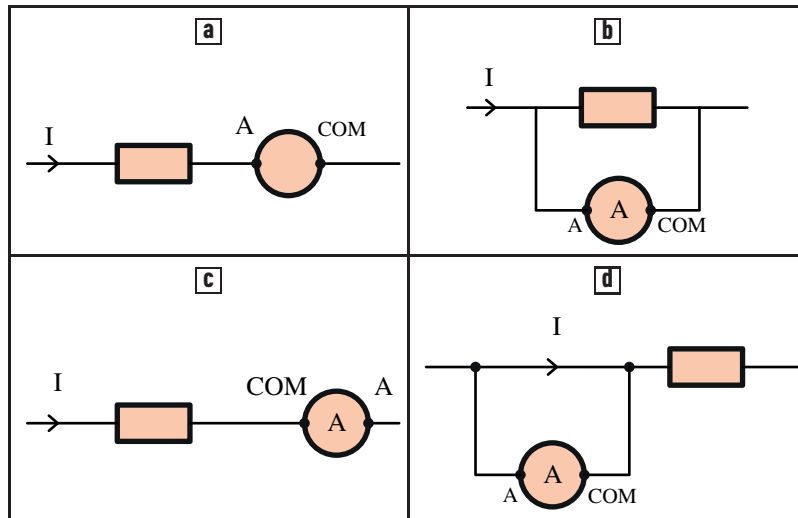
CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

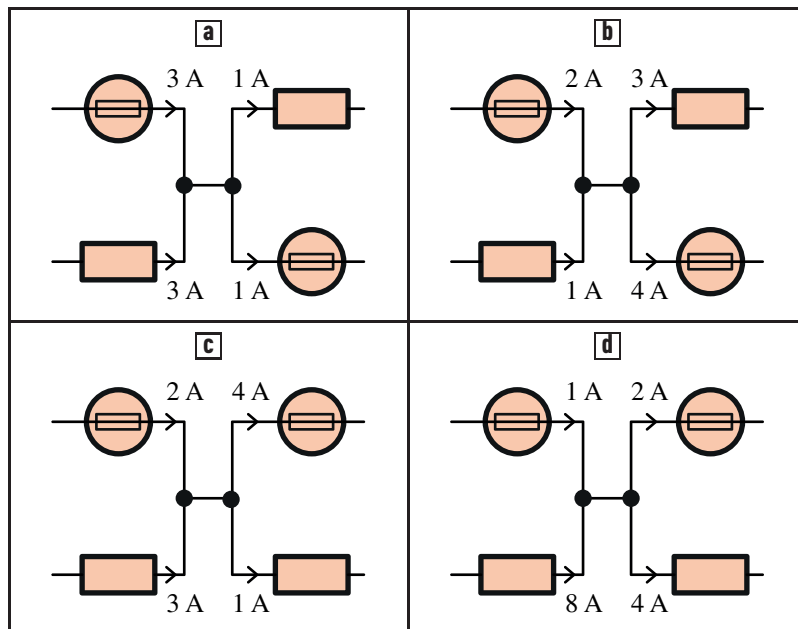
10 min

Corrigé
p. 9

- 1** Quelle est l'unité d'intensité dans le Système International ?
a Le milliampère **b** L'ampère **c** Le volt
- 2** Lequel des dispositifs suivants permet de mesurer le courant I ?

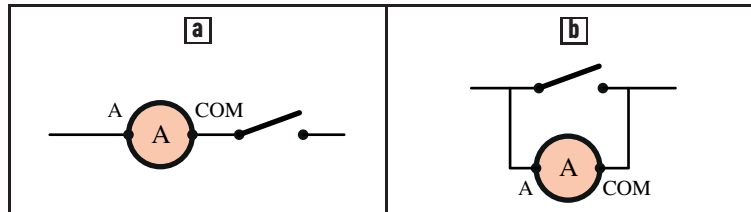


- 3** Parmi les situations suivantes, une seule est possible. Laquelle ?



LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

- 4 Sur quel ampèremètre mesure-t-on une intensité nulle ?



2 Lampe torche



10 min

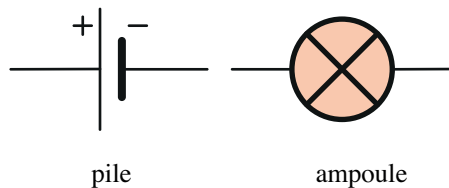
Corrigé
p. 10

Lycée Hector Bertioz, Vincennes

Pour alimenter une ampoule de lampe de poche on utilise une pile. On dispose d'un multimètre numérique avec fonction ampèremètre.

- 1 Faire le schéma du montage qui permet de connaître l'intensité du courant qui parcourt l'ampoule lorsque la lampe fonctionne.

Données : on spécifie les symboles suivants.



- 2 L'intensité de ce courant est de 0,5 A et l'ampèremètre comporte les calibres 100 mA, 300 mA, 1 A et 3 A. Quel est le meilleur calibre à utiliser ?

3 Calculer des intensités

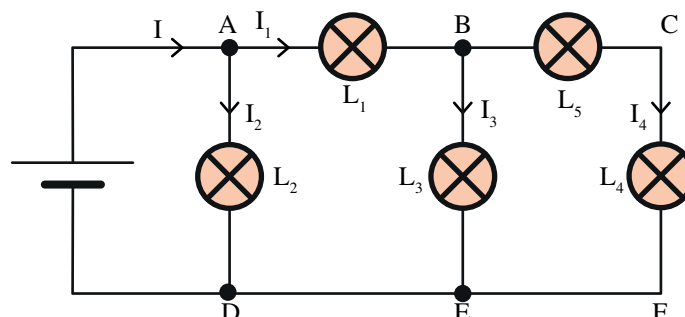


10 min

Corrigé
p. 10

Lycée Henri IV, Paris

Dans les lampes L_2 , L_3 et L_4 , les intensités du courant électrique sont respectivement $I_2 = 50$ mA, $I_3 = 14$ mA et $I_4 = 9,0$ mA.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 1 Quelle est la valeur de l'intensité du courant circulant dans la lampe L_5 ?
- 2 Quelle est la valeur de l'intensité du courant circulant dans la lampe L_1 ?
- 3 Quelle est la valeur de l'intensité du courant dans la branche principale (celle de la pile) ?

4 Calcul d'intensité

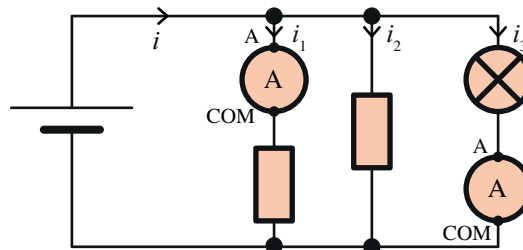


10 min

Corrigé
p. 11

Lycée Louis-le-Grand, Paris

On considère le circuit représenté ci-après. L'ampèremètre sur la branche de la lampe donne une lecture trois fois plus grande que l'autre ampèremètre. Sachant que $i = 2,5 \text{ A}$ et $i_2 = 0,50 \text{ A}$, déterminer l'intensité du courant circulant dans l'ampoule.



5 Loi des nœuds



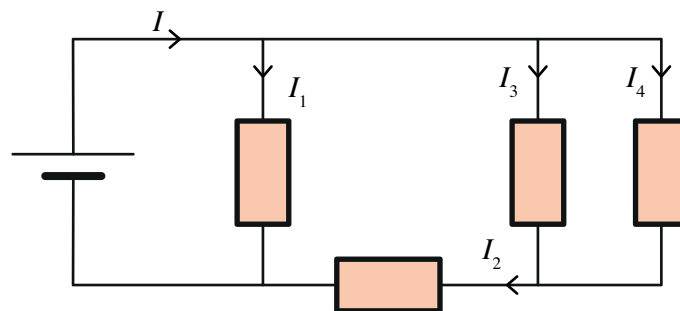
15 min

Corrigé
p. 12

Lycée Chateaubriand, Rennes

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

- 1 Énoncer la loi des nœuds.
- 2 Un circuit électrique a l'allure ci-dessous.



On donne les relations :

$$I_1 = I_4 \quad I_2 = 4I_4 \quad I = 3,7 \text{ A.}$$

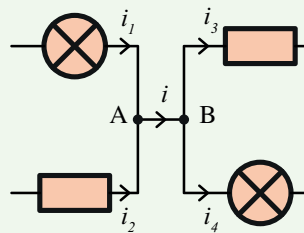
En déduire la valeur de l'intensité du courant dans chacune des branches.

LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 6

- 1 Réponse **b**.
- 2 Réponse **a**. La réponse **c** est aussi acceptable, à condition de préciser qu'il faut prendre l'opposé de la mesure pour déduire I .
- 3 Réponse **c**. Il faut que la somme des intensités des branches de gauche soit égale à la somme des intensités des courants des branches de droite. Détaillons cette affirmation, et considérons la figure suivante :



Ici, la nature des composants importe peu. Appliquons la loi des nœuds au nœud A. Les courants qui vont vers le nœud sont i_1 et i_2 , celui qui en repart est i . Nous avons donc :

$$i = i_1 + i_2$$

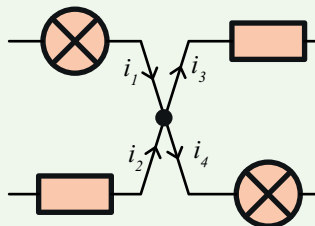
Appliquons à présent la loi des nœuds au nœud B. Le courant qui va vers le nœud est i , ceux qui en repartent sont i_3 et i_4 . Nous avons donc :

$$i_3 + i_4 = i$$

Puisque $i = i_1 + i_2$ et $i = i_3 + i_4$, on a bien :

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

qui est l'égalité que seule la figure **c** satisfait. Une autre façon de procéder consiste à se rendre compte que chacun des circuits proposés est équivalent à un circuit du type suivant :



Ce circuit possède un nœud unique et on voit que l'on doit nécessairement avoir $i_1 + i_2 = i_3 + i_4$.

- 4 Réponse **a**. Une branche avec un conducteur ouvert n'est parcourue par aucun courant. Dans le cas **b**, un courant non nul peut parfaitement circuler dans l'ampèremètre.

COURS

INTERROS

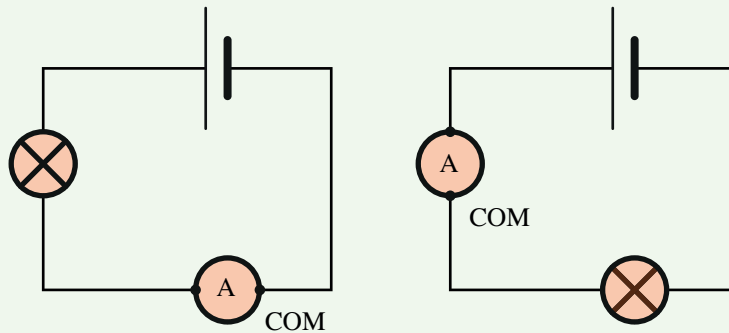
CORRIGÉS

2 Lampe torche

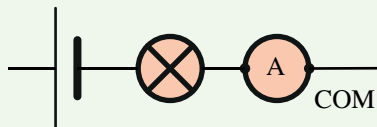
Énoncé
p. 7

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

- 1 Le montage à réaliser est l'un des suivants :



Il faut que l'ampèremètre soit monté en série avec l'ampoule (peu importe s'il est du côté du pôle positif ou négatif de la pile). Il faut également que le circuit soit fermé, sinon aucun courant ne circule dans l'ampoule, donc un schéma tel que celui ci-dessous n'est pas acceptable :



- 2 Les calibres supérieurs à l'intensité qui traverse l'ampoule sont 1 A et 3 A. De ces deux-là, il faut prendre le plus petit, soit 1 AA..

3 Calculer des intensités

Énoncé
p. 7

Lycée Henri IV, Paris

- 1 L'intensité est partout la même dans une branche donnée, donc l'intensité parcourant la lampe L_5 est I_4 , soit 9,0 mA.
2 Nous cherchons l'intensité I_1 . Appliquons la loi des nœuds au point B. Elle s'écrit :

$$I_1 = I_3 + I_4$$

soit :

$$I_1 = 14 + 9,0 = 23 \text{ mA.}$$

- 3 Nous cherchons la valeur de l'intensité I . La loi des nœuds au point A s'écrit :

$$I = I_1 + I_2$$

soit :

$$I = 23 + 50 = 73 \text{ mA.}$$

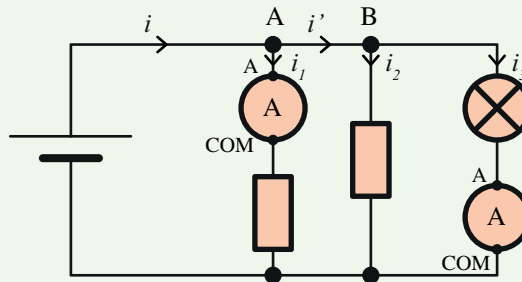
LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

4 Calcul d'intensité

Lycée Louis-le-Grand, Paris

Énoncé
p. 8

Nous reportons et annotons la figure donnée dans l'énoncé.



La loi des nœuds en A s'écrit :

$$i = i_1 + i'$$

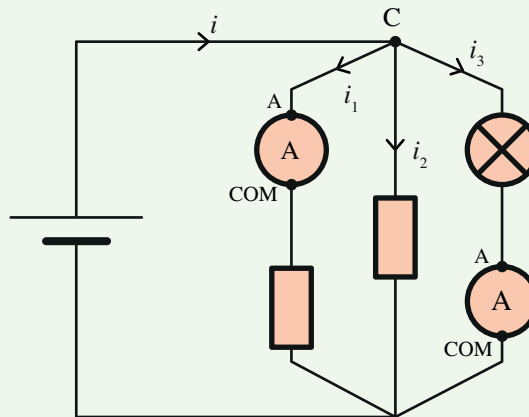
Par ailleurs, la loi des nœuds en B s'écrit :

$$i' = i_2 + i_3.$$

En remplaçant i' par cette expression dans la première égalité, nous avons :

$$i = i_1 + i_2 + i_3.$$

Nous pouvons également écrire directement cette égalité si l'on remarque que le circuit est équivalent au circuit suivant, et que l'on applique la loi des nœuds en C :



L'ampèremètre de gauche mesure l'intensité i_1 , tandis que l'ampèremètre de droite mesure l'intensité i_3 . Les indications de l'énoncé impliquent que :

$$i_3 = 3i_1$$

donc

$$i = \frac{i_3}{3} + i_2 + i_3 = \frac{4}{3}i_3 + i_2$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

donc

$$i_3 = \frac{3}{4}(i_1 - i_2).$$

L'application numérique donne :

$$i_3 = \frac{3}{4} \times 2,0 = 1,5 \text{ A.}$$

L'intensité du courant dans l'ampoule est 1,5 A.

5 Loi des nœuds

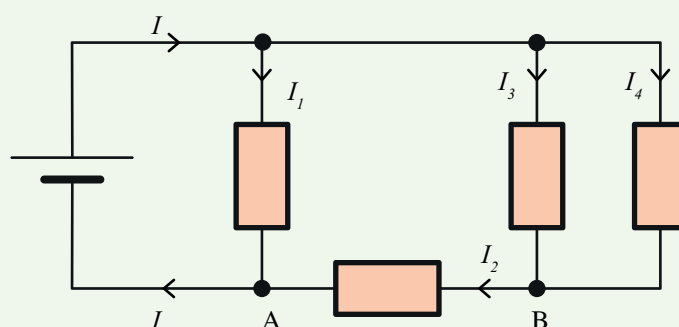
Énoncé
p. 8

Lycée Chateaubriand, Rennes



1 La somme des intensités des courants qui vont vers le nœud est égale à la somme des intensités des courants qui partent du nœud.

2 Nous reportons et annotons ici la figure de l'énoncé.



Nous avons reporté l'intensité I dans la partie inférieure gauche, car l'intensité est la même dans une branche donnée (voir le cours).

La loi des nœuds au nœud A s'écrit :

$$I = I_1 + I_2$$

tandis qu'au nœud B elle s'écrit :

$$I_2 = I_3 + I_4.$$

Or $I_2 = 4I_4$ donc :

$$4I_4 = I_3 + I_4$$

d'où l'on déduit :

$$3I_4 = I_3.$$

On a donc :

$$I = I_1 + I_3 + I_4 = I_4 + I_3 + I_4 = 5I_4$$

soit

$$I_4 = I_1 = \frac{I}{5}, I_3 = 3\frac{I}{5}, I_2 = 4\frac{I}{5}.$$

LA LOI DES NŒUDS • CHAP. 1

On peut vérifier que l'on a bien :

$$I = I_1 + I_2 = \frac{I}{5} + 4\frac{I}{5}.$$

L'application numérique donne :

$$I_1 = I_4 = 0,74 \text{ A.}$$

$$I_2 = 4 \times 0,74 = 3,0 \text{ A.}$$

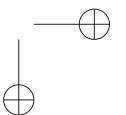
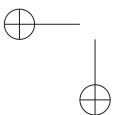
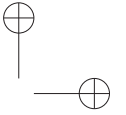
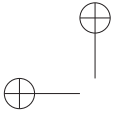
$$I_3 = 3 \times 0,74 = 2,2 \text{ A.}$$

Nous gardons deux chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle I est donnée dans l'énoncé.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre 2

Loi des mailles

Plan du chapitre

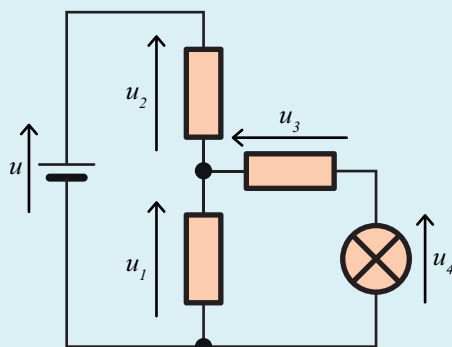
1. Introduction
2. Qu'est-ce qu'une maille ?
3. Loi d'additivité des tensions
4. Énoncé de la loi des mailles
5. Rappel : mesure d'une tension

1 Introduction

Exercice type

Lycée Stanislas, Paris

On considère le circuit suivant :



Le générateur délivre une tension constante $u = 6,0 \text{ V}$.
On mesure par ailleurs $u_1 = 3,0 \text{ V}$ et $u_3 = 1,4 \text{ V}$.

- 1 Indiquer, en faisant un schéma, comment il faut connecter le voltmètre pour mesurer la tension u_3 .
- 2 En utilisant la loi des mailles, déterminer les tensions u_2 et u_4 .

Voir corrigé page 19

Ce chapitre introduit la loi des mailles, qui s'applique aux tensions que l'on peut mesurer entre les bornes des divers composants de la maille d'un circuit.

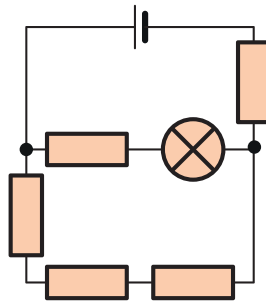
2 Qu'est-ce qu'une maille ?

Définition 1

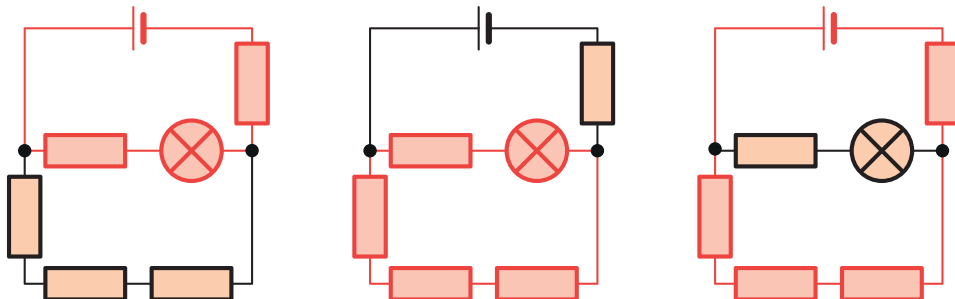
Une maille d'un circuit électrique est un chemin fermé de ce circuit.

Parcourir une maille, c'est décrire une fois ce chemin de manière à revenir au point de départ.

Exemple : considérons le circuit suivant :

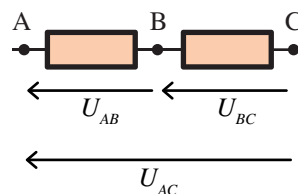


Il comporte trois mailles, qui sont représentées de couleur rouge ci-dessous :



3 Loi d'additivité des tensions

Considérons la portion de circuit suivante :



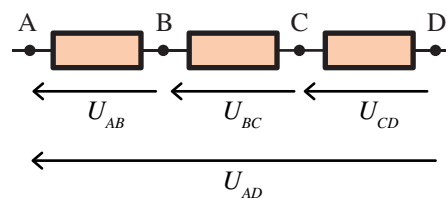
LOI DES MAILLES • CHAP. 2

Nous avons :

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$$

Il s'agit de l'équivalent d'une relation de Chasles sur les tensions. Les lettres aux extrémités se conservent (ici A, en rouge, et C, en bleu) tandis que les lettres intermédiaires doivent coïncider, comme des dominos (ici la lettre B).

Nous pouvons étendre cette relation à un plus grand nombre de tensions. Ainsi, avec cette portion de circuit :



nous avons la relation :

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD}$$

Ici, les lettres extrêmes sont conservées (A et D) et les lettres intermédiaires (B et C) coïncident comme des dominos.

Remarque : Cette relation est due au fait qu'une tension peut s'écrire comme une différence de potentiel : en tout point M d'un circuit on peut définir un potentiel V_M . La tension entre deux points A et B est alors, par définition :

$$U_{AB} = V_A - V_B.$$

Nous avons donc :

$$U_{AB} + U_{BC} = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) = V_A - V_C = U_{AC}.$$

4 Énoncé de la loi des mailles

À RETENIR

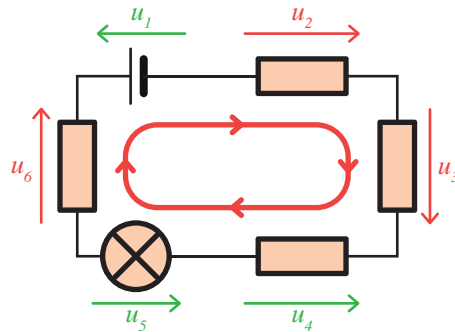
Dans toute maille d'un circuit, la somme des tensions orientées dans un sens est égale à la somme des tensions orientées dans l'autre sens.

Qu'entendons-nous par « les tensions orientées dans un sens » ? Lorsqu'on parcourt une maille (dans un sens donné, arbitraire, cela peut être au choix le sens des aiguilles d'une montre ou le sens trigonométrique), on rencontre des tensions qui ont même sens que celui du parcours, et d'autres qui ont le sens opposé. Considérons par exemple le circuit page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Nous avons indiqué un sens de parcours (ici dans le sens des aiguilles d'une montre) par une boucle rouge fléchée dans la partie centrale. Lorsque l'on parcourt cette maille, on rencontre des flèches de tension qui ont le sens du parcours : ce sont les flèches u_2 , u_3 et u_6 , que l'on a représentées aussi en rouge. Les autres flèches (u_1 , u_4 et u_5) ont un sens opposé à celui du parcours. On les a représentées en vert.

La loi des mailles nous indique que la somme des tensions « du groupe rouge » est égale à la somme des tensions « du groupe vert » :

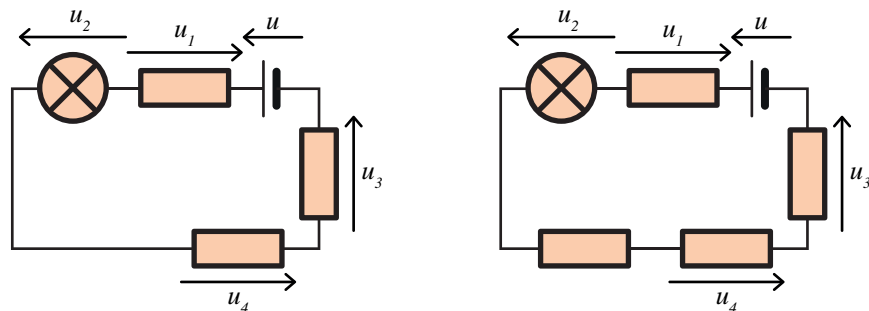
$$u_2 + u_3 + u_6 = u_1 + u_4 + u_5.$$

Remarque : si toutes les flèches de tension ont même sens, alors leur somme est nulle (puisqu'il n'y a pas de tension dans l'autre sens).

⚠ ATTENTION

Il est important qu'il y ait des flèches de tension pour *tous* les composants de la maille.

Considérons les deux circuits ci-dessous :



LOI DES MAILLES • CHAP. 2

Sur le circuit de gauche, tous les composants ont une flèche de tension. La flèche qui a le sens des aiguilles d'une montre est u_1 , et toutes les autres flèches ont le sens contraire, donc nous pouvons écrire :

$$u_2 + u + u_3 + u_4 = u_1.$$

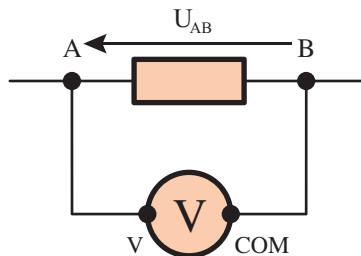
En revanche, même si le circuit de droite lui ressemble beaucoup, on ne peut pas écrire la même égalité : il manque une flèche de tension au composant en bas à gauche !

Remarque : le fait qu'il n'y ait pas de flèche de tension le long des parties du circuit où l'on a seulement des fils conducteurs (comme dans la partie en bas à gauche du circuit de gauche, ou sur la branche de gauche) n'a pas d'importance, car la tension est nulle aux bornes d'un conducteur parfait. On peut, si on le veut, écrire ces tensions, mais elles valent zéro et ne changent rien aux sommes des tensions.

5 Rappel : mesure d'une tension

On mesure les tensions à l'aide d'un voltmètre (ou d'un multimètre utilisé en voltmètre). Il doit toujours être branché en *dérivation* entre les deux points du circuit entre lesquels on souhaite mesurer la tension.

Pour mesurer à l'aide d'un multimètre numérique une tension U_{AB} , on relie sa borne V au point A du circuit et sa borne COM au point B du circuit, comme représenté ci-dessous :



➔ Solution de l'exercice type

Lycée Stanislas, Paris

- 1 Il faut brancher le voltmètre en dérivation, avec sa borne COM à l'origine de la flèche et la borne V du côté de la pointe de la flèche, comme indiqué sur le schéma page suivante.

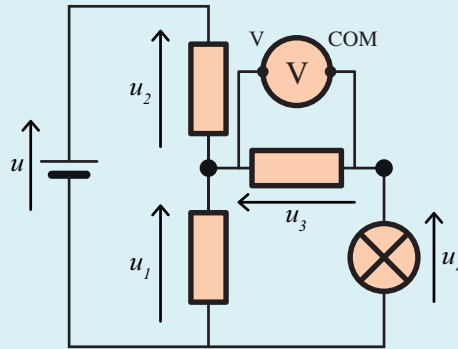
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Stanislas, Paris



- 2 Dans la maille de gauche, il n'y a qu'une tension qui va dans le sens des aiguilles d'une montre (u) et deux tensions qui vont dans le sens contraire (u_1 et u_2) donc nous avons :

$$u = u_1 + u_2$$

d'où l'on déduit :

$$u_2 = u - u_1 = 3,0 \text{ V.}$$

Dans la maille de droite, il n'y a que la tension u_1 qui va dans le sens des aiguilles d'une montre, alors que u_3 et u_4 vont dans le sens contraire.

⚠ ATTENTION

Notons que le sens d'une tension dépend de la maille. Ainsi, u_1 a le sens des aiguilles d'une montre dans la maille de droite, mais le sens contraire dans la maille de gauche.

Nous pouvons donc écrire :

$$u_1 = u_3 + u_4$$

donc

$$u_4 = u_1 - u_3 = 3,0 - 1,4 = 1,6 \text{ V.}$$

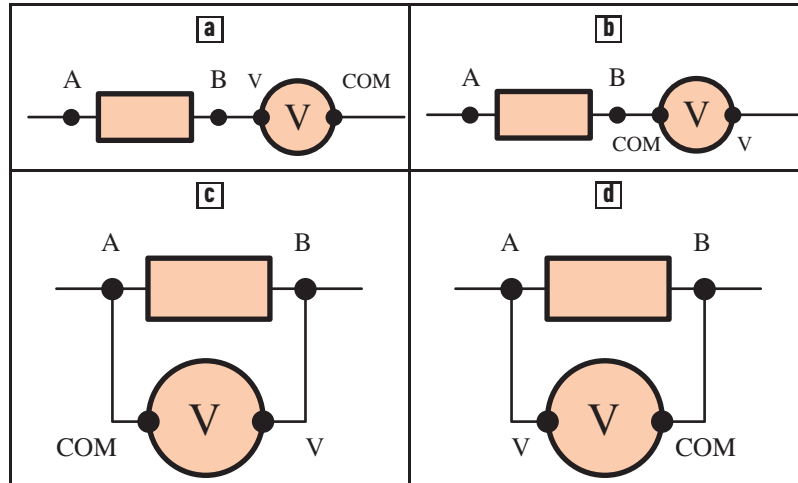
Voir énoncé page 15

LOI DES MAILLES • CHAP. 2

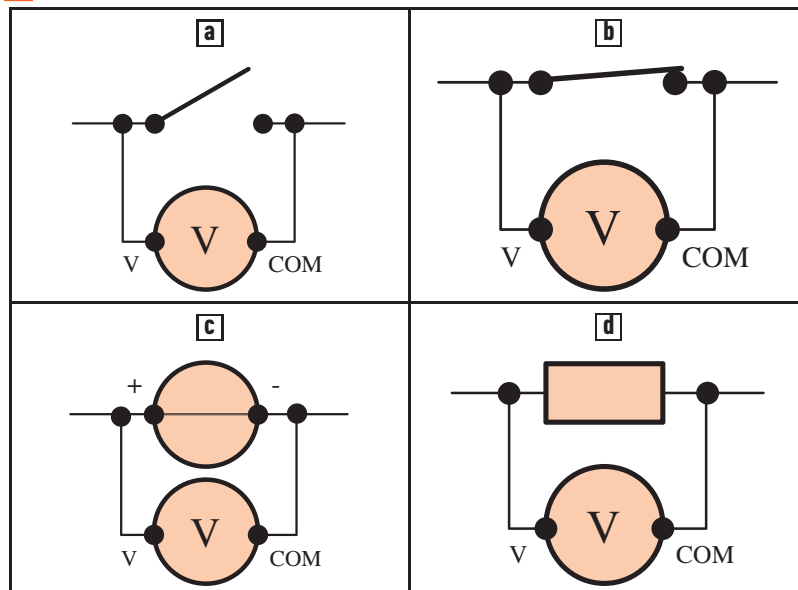
1 QCM Testez vos connaissances

10 min Corrigé
p. 25

- 1 Quelle est l'unité de tension dans le Système International ?
☐ a L'ampère ☐ b Le volt ☐ c L'ohm
- 2 Lequel des dispositifs suivants permet de mesurer la tension U_{AB} ?



- 3 Laquelle des expressions suivantes est-elle correcte ?
☐ a $U_{EG} = U_{FE} + U_{FG}$ ☐ b $U_{EG} = U_{FE} + U_{GF}$
☐ c $U_{EG} = U_{EF} + U_{FG}$ ☐ d $U_{EG} = U_{GE} + U_{GF}$
- 4 La tension est la même aux bornes de dipôles montés
☐ a en série ☐ b en dérivation
- 5 Sur quel voltmètre mesure-t-on une tension nulle ?



COURS

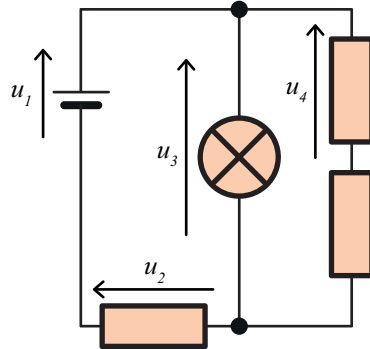
INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

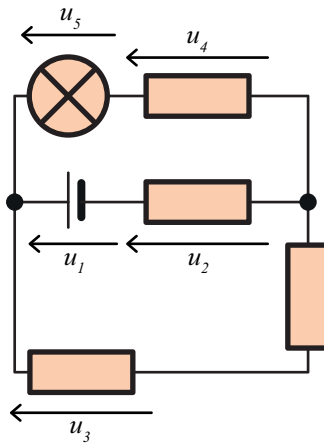
6 Pour chacun des circuits suivants, indiquer la ou les égalité(s) correcte(s), en utilisant la loi des mailles.

(a)



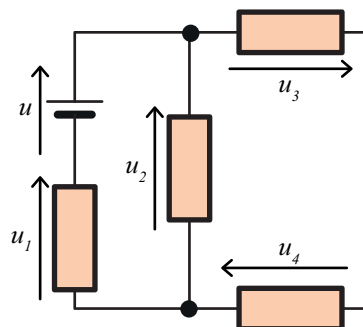
- ☐ a $u_1 = u_2$
- ☐ b $u_1 + u_2 + u_4 = u_3$
- ☐ c $u_1 + u_2 = u_4$
- ☐ d $u_3 = u_4$
- ☐ e $u_1 + u_2 = u_3$

(b)



- ☐ a $u_1 + u_2 = u_3$
- ☐ b $u_1 + u_2 - u_4 = u_5$
- ☐ c $u_1 = u_3$
- ☐ d $u_3 = u_4 + u_5$

(c)



- ☐ a $u_2 + u_3 + u_4 = 0$
- ☐ b $u + u_1 = 0$
- ☐ c $u + u_2 = u_1$
- ☐ d $u_2 = u_3 + u_4$

LOI DES MAILLES • CHAP. 2

2 Calcul de tensions

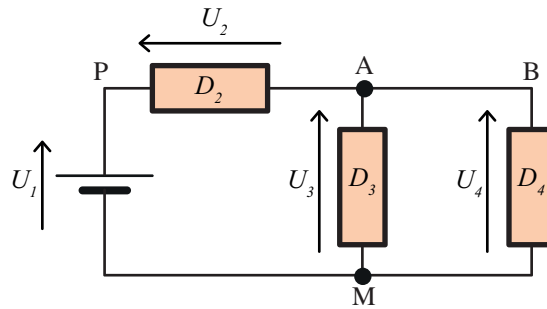


5 min

Corrigé
p. 25

Lycée Pasteur, Neuilly

On considère le circuit ci-après. Un générateur est relié à trois dipôles D_2 , D_3 et D_4 . On mesure $U_2 = 6,00 \text{ V}$, $U_3 = 12,5 \text{ V}$.



Déterminer la valeur des tensions U_1 et U_4 .

3 Calculer des tensions

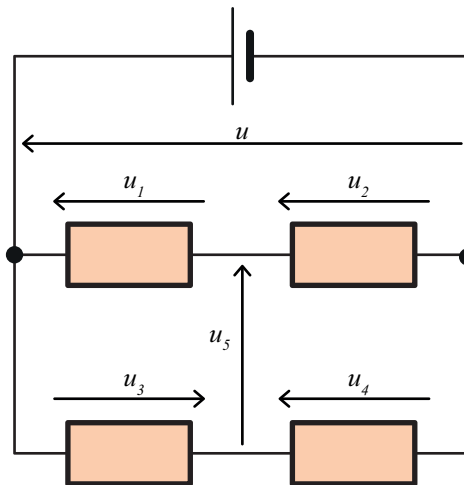


10 min

Corrigé
p. 25

Lycée Marcellin Berthelot, Toulouse

On considère le montage suivant :



Nous avons : $u = 12,0 \text{ V}$, $u_1 = 2,00 \text{ V}$ et $u_4 = 2,40 \text{ V}$.

- 1 Donner les expressions de u_2 , u_3 et u_5 en fonction de u , u_1 et u_4 .
- 2 Calculer numériquement les valeurs de u_2 , u_3 et u_5 .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Additivité des tensions



10 min

Corrigé
p. 27

Lycée Pierre d'Aragon, Muret

 Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec 

Soient A , B , C , D et E les points d'un circuit électrique (A , B , C , D et E sont consécutifs). On donne $U_{AE} = 24 \text{ V}$, $U_{AB} = 2,0 \text{ V}$ et $U_{DE} = -6,0 \text{ V}$.

- 1 Calculer U_{AD} et U_{BD} .
- 2 Sachant que, pour ce circuit particulier, on a la relation $U_{DE} = U_{BC} + U_{DC}$, calculer U_{BC} et U_{CD} .

LOI DES MAILLES • CHAP. 2

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 21

- 1 Réponse **b** : c'est le volt, de symbole V.
- 2 Réponse **d** : il faut brancher le voltmètre en dérivation, avec la borne V du côté de la première lettre. La réponse **c** est aussi acceptable, à condition de préciser qu'il faut prendre l'opposé du résultat de la mesure pour obtenir U_{AB} car on mesure aussi U_{BA} .
- 3 Réponse **c**. C'est la seule réponse qui correspond à une application correcte de la loi d'additivité des tensions.
- 4 Réponse **b**.
- 5 Réponse **b** : la tension est nulle aux bornes d'un conducteur parfait (un interrupteur fermé est un conducteur parfait).
- 6 (a) Réponse **e**. Les réponses **c** et **d** sont incorrectes car il manque la tension aux bornes du dipôle en bas à droite du circuit.
(b) Réponse **b**. Les réponses **a** et **d** sont incorrectes car, là encore, il manque la tension aux bornes du dipôle en bas à droite du circuit.
(c) Réponse **a**.

2 Calcul de tensions

Énoncé
p. 23

Lycée Pasteur, Neuilly

En écrivant la loi des mailles dans la maille de gauche, nous obtenons :

$$U_1 = U_2 + U_3 = 6 + 12,5 = 18,5 \text{ V.}$$

L'application de la loi des mailles dans la maille de droite est très simple et donne :

$$U_4 = U_3 = 12,5 \text{ V.}$$

Remarque : on peut vérifier ces égalités en utilisant la loi d'additivité des tensions :

$$U_1 = U_{PM} = U_{PA} + U_{AM} = U_2 + U_3$$

et

$$U_4 = U_{BM} = U_{BA} + U_{AM} = 0 + U_3.$$

3 Calculer des tensions

Énoncé
p. 23

Lycée Marcellin Berthelot, Toulouse

- 1 On utilise la loi des mailles dans la maille supérieure. Si on la parcourt dans le sens des aiguilles d'une montre, on rencontre deux tensions qui ont le sens du parcours : u_1 et u_2 . Si, en revanche, on la parcourt dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, on rencontre seulement une tension de même sens, la tension u .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On a donc :

$$u_1 + u_2 = u$$

et ainsi :

$$u_2 = u - u_1.$$

De même, on peut écrire, en considérant la « grande » maille (celle qui passe par la branche supérieure du circuit, contenant le générateur, et par la branche inférieure) :

$$u + u_3 = u_4$$

(prendre garde au sens des flèches !)

On peut donc écrire :

$$u_3 = u_4 - u.$$

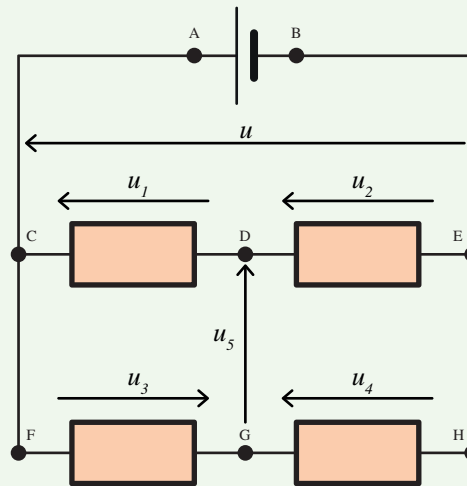
Enfin,

$$u_4 + u_5 = u_2 = u - u_1$$

donc :

$$u_5 = u - u_1 - u_4.$$

Cette dernière relation peut surprendre, car u_5 ne correspond à aucun conducteur du circuit. Cette tension est « hors maille ». Toutefois, la loi des mailles telle que nous l'avons vue en cours reste valable. Pour s'en convaincre, il suffit d'utiliser la loi d'additivité des tensions. Pour cela nous introduisons les points A à H comme indiqué sur la figure ci-après.



Nous avons alors :

$$u = u_{AB}$$

$$u_1 = u_{CD}$$

$$u_2 = u_{DE}$$

$$u_3 = u_{GF}$$

$$u_4 = u_{GH}$$

$$u_5 = u_{DG}$$

LOI DES MAILLES • CHAP. 2

MÉTHODE

On prend garde à ce que la première lettre en indice soit celle qui se trouve du côté de la pointe de la flèche.

Nous avons alors :

$$\begin{aligned} u_5 = u_{DG} &= u_{DC} + u_{CA} + u_{AB} + u_{BE} + u_{EH} + u_{HG} \\ &= -u_1 + 0 + u + 0 + 0 - u_4 = u - u_1 - u_4. \end{aligned}$$

MÉTHODE

Bien que les sommes ci-dessus soient longues, il est très simple de d'assurer qu'elles sont justes en utilisant la méthode vue en cours.

- 2 L'application numérique donne, en remplaçant les valeurs de u , u_1 et u_4 par celles données dans l'énoncé :

$$u_2 = 12,0 - 2,0 = 10,0 \text{ V.}$$

$$u_3 = 2,4 - 12,0 = -9,6 \text{ V.}$$

$$u_5 = 12,0 - 2,0 - 2,4 = 7,6 \text{ V.}$$

Les tensions de l'énoncé étant données au dixième de volt près, c'est la précision avec laquelle nous écrivons les résultats.

4 Additivité des tensions

→ Énoncé
p. 24

Lycée Pierre d'Aragon, Muret



- 1 D'après la loi d'additivité des tensions, on a :

$$U_{AD} = U_{AE} + U_{ED} = U_{AE} - U_{DE} = 24 - (-6) = 30 \text{ V.}$$

De manière analogue :

$$U_{BD} = U_{BA} + U_{AD} = -U_{AB} + U_{AD} = -2 + 30 = 28 \text{ V}$$

(on utilise la tension U_{AD} que l'on vient de déterminer).

- 2 En utilisant la nouvelle relation donnée dans l'énoncé :

$$U_{BC} = U_{BD} + U_{DC} = U_{BD} + U_{DE} - U_{BC}$$

donc :

$$2U_{BC} = U_{BD} + U_{DE}$$

et par conséquent

$$U_{BC} = \frac{U_{BD} + U_{DE}}{2} = \frac{28 - 6}{2} = 11 \text{ V.}$$

On en déduit la valeur de U_{DC} :

$$U_{DC} = U_{DE} - U_{BC} = -6 - 11 = -17 \text{ V}$$

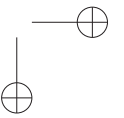
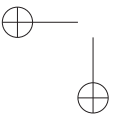
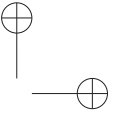
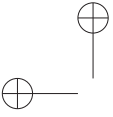
donc

$$U_{CD} = -U_{DC} = +17 \text{ V.}$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

3

Les dipôles électriques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Notion de dipôle
3. Caractéristique d'un dipôle
4. Le conducteur ohmique
5. Mesurer une résistance
6. Capteurs résistifs

1 Introduction

Exercice type

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

La caractéristique intensité-tension d'un dipôle est une droite passant par l'origine des coordonnées et par le point M (20,0 mA ; 4,00 V).

- 1 Quel est ce dipôle ?
- 2 Calculer sa résistance et sa conductance.
- 3 Par quel courant doit-il être parcouru pour qu'apparaisse à ses bornes une tension de 8,00 V ?

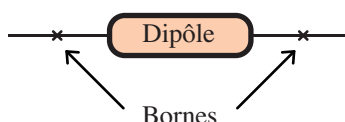
Voir corrigé page 33

Cet exercice fait appel à la notion de dipôle. Comme nous allons le voir dans cette section, l'appellation dipôle recouvre un grand nombre de dispositifs électriques différents. Parmi eux, les conducteurs ohmiques, parfois appelés par abus de langage « résistances », jouent un rôle de premier plan.

2 Notion de dipôle

Définition 1

Un dipôle est un dispositif électrique qui comporte *deux* bornes (d'où son nom) qui lui permettent d'être raccordé à un circuit.



Ainsi, une ampoule électrique, une pile, un moteur, etc. sont des dipôles. Le mot dipôle recouvre donc un concept très général.

3 Caractéristique d'un dipôle

Un dipôle est entièrement déterminé par la relation entre la tension U à ses bornes et l'intensité I du courant qui le traverse. Cette relation peut être exprimée sous forme d'une fonction qui donne U pour toute valeur de I :

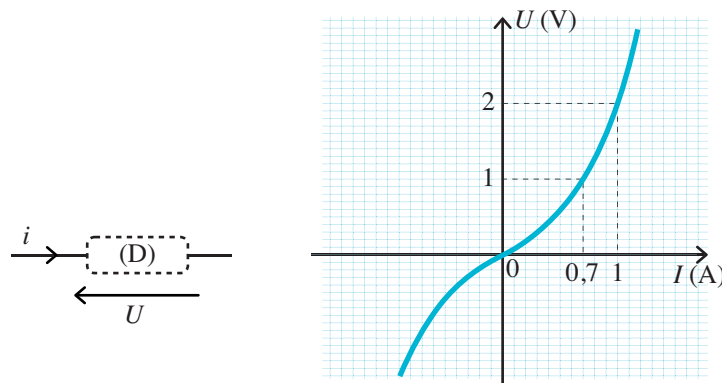
$$U = f(I)$$

On peut aussi parfois représenter la relation sous forme d'une fonction qui donne I pour toute valeur de U :

$$I = g(U)$$

Il est fréquent de donner la fonction f ou g sous forme graphique. Le graphe est alors appelé la caractéristique du dipôle. Selon que l'on représente graphiquement f ou g , on parle de caractéristique intensité-tension ou tension-intensité.

L'exemple ci-dessous montre la caractéristique d'un dipôle D. On y lit par exemple que si la tension vaut 2 V aux bornes du dipôle, alors il est traversé par un courant d'intensité 1 A, ou que si le courant qui le traverse a pour intensité 0,7 A, alors la tension à ses bornes est de 1 V.



La caractéristique présentée ci-dessus est une caractéristique intensité-tension, ce qui signifie qu'on a reporté les intensités sur l'axe des abscisses et les tensions sur l'axe des ordonnées.

4 Le conducteur ohmique

Définition 2

Un conducteur ohmique est un dipôle dont la caractéristique est une droite passant par l'origine.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

La tension U aux bornes de la résistance est donc proportionnelle à l'intensité I .

À RETENIR

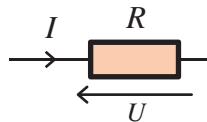
La loi d'Ohm est la relation vérifiée par la tension U et l'intensité I pour un conducteur ohmique. Elle s'écrit :

$$U = R \times I$$

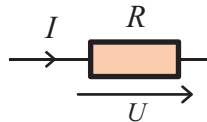
où R est appelée la résistance.

On notera que par abus de langage le mot résistance peut désigner aussi bien le dipôle que la grandeur physique qui le caractérise.

Remarque : pour appliquer la loi d'Ohm telle qu'indiquée ci-dessus, il faut que l'intensité et la tension soient orientées en sens contraire, comme indiqué ci-après :



On a alors bien $U = R \times I$. On appelle cette convention d'orientation la convention récepteur. Considérons l'autre cas, où les orientations sont les mêmes, comme représenté ci-dessous :



Dans ce cas, on a $U = -R \times I$. On parle de convention générateur.

À RETENIR

Dans le Système International, la résistance s'exprime en ohm, de symbole Ω .

Remarque : justifions l'appellation *résistance* donnée à cette grandeur. On peut écrire la loi d'Ohm sous la forme

$$I = \frac{U}{R}.$$

Si on impose la tension U aux bornes d'un conducteur ohmique, plus on augmente la résistance R , plus l'intensité I est petite. Le conducteur *résiste* d'autant plus au passage du courant que sa résistance est grande.

On parle parfois plutôt de la conductance d'un conducteur ohmique. La conductance est l'inverse de la résistance. Elle est notée G :

$$G = \frac{1}{R}.$$

COURS

INTERROS

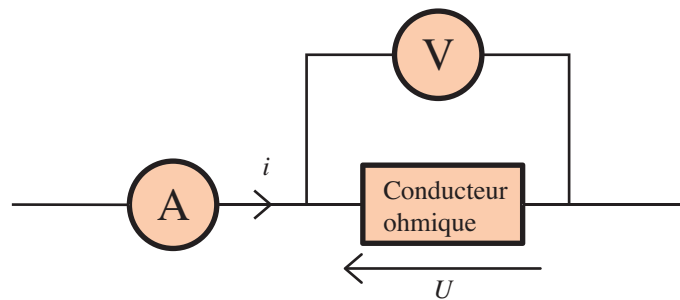
CORRIGÉS

Dans le Système International, la conductance est exprimée en siemens, de symbole S. Un conducteur ohmique de résistance $R = 10 \, \Omega$ a ainsi pour conductance $G = \frac{1}{R} = 0,10 \, \text{S}$.

Remarque : la pente de la droite caractéristique intensité-tension d'un conducteur ohmique est égale à la résistance.

5 Mesurer une résistance

Pour mesurer la résistance d'un conducteur ohmique, il suffit de connaître un point de la caractéristique, puisqu'on sait que celle-ci est une droite passant par l'origine. Il suffit donc mesurer la tension aux bornes de la résistance, avec un voltmètre (ou un multimètre), pendant qu'on mesure l'intensité qui la traverse, avec un ampèremètre (ou un multimètre utilisé en ampèremètre).



Le voltmètre permet de mesurer U , l'ampèremètre permet de mesurer i . Le rapport $\frac{U}{i}$, d'après la loi d'Ohm, donne la valeur de la résistance R .

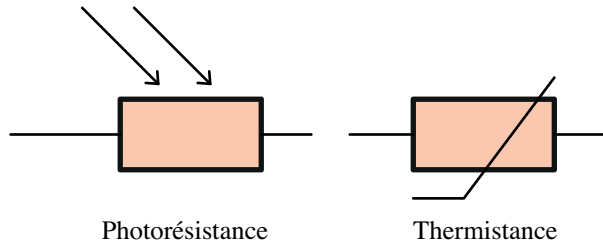
6 Capteurs résistifs

Définition 3

Les capteurs résistifs sont des conducteurs ohmiques dont la résistance dépend d'un paramètre physique (température, force, pression, etc.).

Il existe de très nombreux types de capteurs résistifs. Certains, d'un usage très répandu, ont un nom et symbole particulier. Nous en donnons quelques exemples page ci-contre.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3



Les photorésistances sont des conducteurs ohmiques dont la résistance dépend de l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. Dans l'obscurité, sa résistance est très importante (supérieure à $1 \text{ M}\Omega$) et elle décroît très fortement pour atteindre quelques ohms en plein soleil.

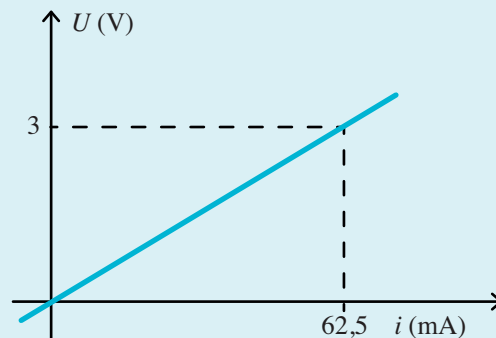
Les thermistances sont des conducteurs ohmiques dont la résistance dépend de la température.

Il existe un très grand nombre de capteurs différents, sensibles à la pression, au degré d'humidité, au champ magnétique, etc.

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

1



La caractéristique de ce dipôle étant une droite passant par l'origine, il s'agit d'un conducteur ohmique.

2

La résistance de ce conducteur ohmique est donnée par la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3}{20 \times 10^{-3}} = 150 \, \Omega.$$

Sa conductance est :

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{150} = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ S}.$$

Cette conductance peut encore s'écrire $G = 6,67 \text{ mS}$ (milliSiemens).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

- 3 Il s'agit d'un cas typique d'application de la loi d'Ohm. En effet, on nous donne l'intensité du courant (resp. la tension) et il faut en déduire la tension (resp. l'intensité du courant). Cela se fait toujours à l'aide de la loi d'Ohm pour un conducteur ohmique, ou via une lecture graphique utilisant la caractéristique si le dipôle n'est pas un conducteur ohmique. Ici, l'application de la loi d'Ohm donne :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{8}{200} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ A} = 40,0 \text{ mA}.$$

Il faut qu'un courant de 40 mA traverse la résistance.

Cela pouvait se voir directement : on veut que la tension aux bornes de la résistance soit double de celle du point de fonctionnement indiqué dans l'énoncé. Il faut donc que le courant soit double des 20 mA correspondant à ce point de fonctionnement.

Voir énoncé page 29

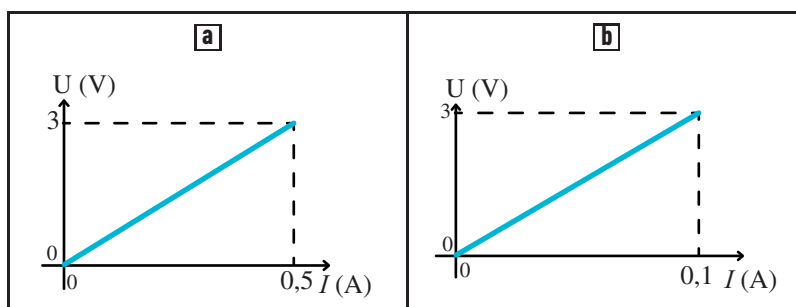
LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

1 QCM Testez vos connaissances

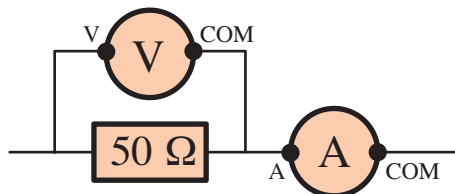
5 min

Corrigé
p. 41

- 1 En quelle unité s'exprime la résistance d'un conducteur ohmique dans le Système International ?
☐ a En ampères ☐ b En volts ☐ c En ohms
- 2 Lequel des deux conducteurs ohmiques suivants a la plus grande résistance ?



- 3 Répondre par vrai ou faux :
 (a) Lorsque la tension aux bornes d'un conducteur ohmique est nulle, l'intensité du courant qui le traverse est nulle.
 (b) À tension U constante, plus la conductance d'un conducteur ohmique est grande, plus l'intensité du courant que le traverse est petite.
- 4 Sachant que sur l'ampèremètre on mesure une intensité $I = 200$ mA, quelle valeur lit-on sur le voltmètre ?



- ☐ a 200 mV ☐ b 1 V ☐ c 10 V
- ☐ d On ne mesure rien car il n'est pas correctement branché.

2 Étude d'un dipôle



10 min

Corrigé
p. 41

Lycée Gabriel Fauré, Paris

La caractéristique intensité-tension d'un dipôle est une droite passant par l'origine des coordonnées et par le point M (12,5 mA ; 5,0 V).

- 1 Quelle est la nature de ce dipôle ?
- 2 Calculer sa résistance et sa conductance. Préciser les unités.
- 3 Quelle tension faut-il imposer à ses bornes pour qu'il soit parcouru par un courant d'intensité 50,0 mA ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

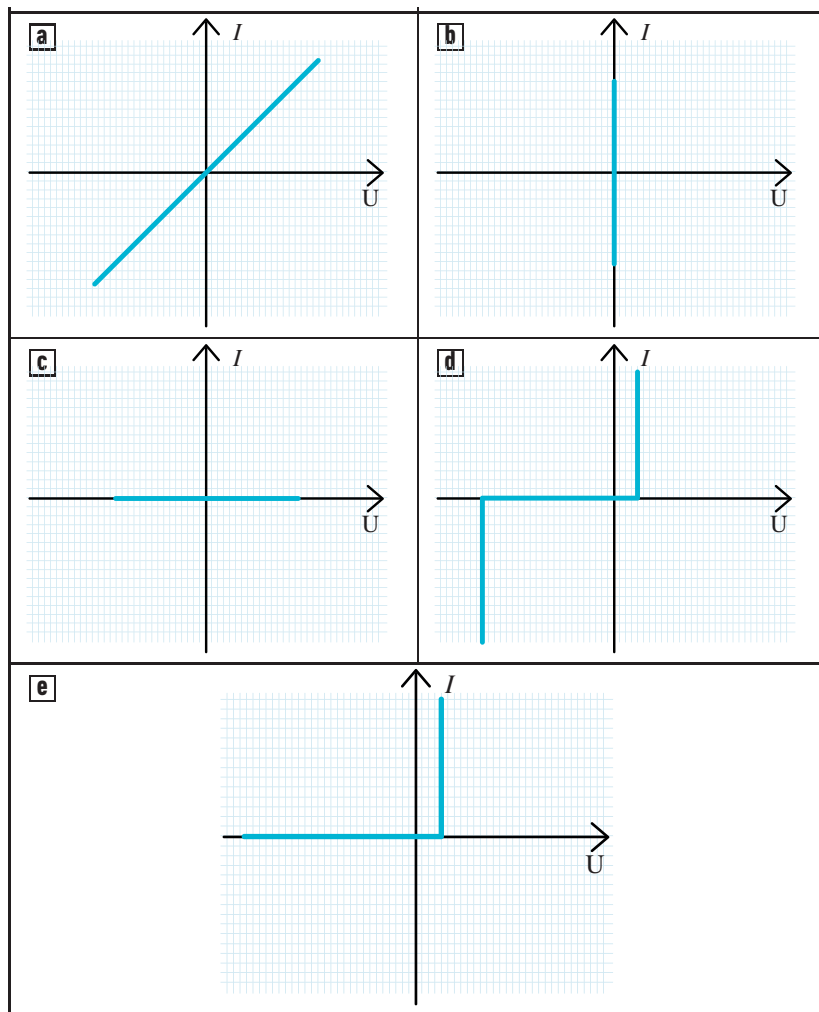
3 Identifier les dipôles



10 min

Corrigé
p. 41

On représente ci-après les caractéristiques tension-intensité de cinq dipôles différents.



Ces cinq dipôles sont, dans le désordre :

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1 Une diode | 4 Une diode Zener |
| 2 Un conducteur ohmique | |
| 3 Un interrupteur ouvert | 5 Un interrupteur fermé |

Identifier à quel dipôle correspond chaque caractéristique.

Indications : une diode est un dipôle qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens (sens direct). Une diode Zener se comporte comme une diode classique dans le sens direct, mais laisse aussi passer le courant dans l'autre sens à condition que la tension à ses bornes, en valeur absolue, soit supérieure à un certain seuil.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

4 Conducteur ohmique



15 min

Corrigé
p. 42

Lycée Marie Curie, Sceaux

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

La caractéristique d'un conducteur ohmique passe par un point de coordonnées $I = 62,5 \text{ mA}$ et $U = 3,0 \text{ V}$.

- 1 Quelle est la valeur de sa résistance ?
- 2 Sachant que la puissance électrique qu'il consomme s'écrit $P = U \times I$, et que le fabricant précise $P_{\max} = 0,25 \text{ W}$, on demande :
 - (a) Quelle est l'intensité maximale du courant qui peut le traverser sans le détériorer ?
 - (b) Quelle est alors la tension à ses bornes ?

5 Puissance maximale



15 min

Corrigé
p. 43

Lycée Notre-Dame, Bourg-la-Reine

La puissance maximale d'un conducteur ohmique de $4,7 \cdot 10^2 \Omega$ est $2,5 \cdot 10^2 \text{ mW}$. Quelles est l'intensité maximale du courant qui peut le traverser, et la tension maximale que l'on peut imposer à ses bornes ?

Indication : on rappelle que la puissance $\mathcal{P}$ dissipée dans un dipôle parcouru par un courant d'intensité I et soumis à une tension U est $\mathcal{P} = U \times I$.

6 Nuage de points



20 min

Corrigé
p. 44

Pour évaluer la valeur de la résistance d'un conducteur ohmique le plus précisément possible, on réalise plusieurs mesures de la tension U à ses bornes lorsqu'il est parcouru par un courant d'intensité I . On reporte les mesures dans le tableau suivant.

$U \text{ (V)}$	1,6	4,9	4,0	6,0	8,7	8,5	11,9
$I \text{ (A)}$	0,4	0,9	1,1	1,5	2,0	2,4	2,8

$U \text{ (V)}$	11,6	13,8	15,6	18,7	20,1	19,0	23,2
$I \text{ (A)}$	3,1	3,7	4,1	4,5	4,7	5,1	5,6

- 1 Faire un schéma du montage.
- 2 Reporter sur un graphe avec I en abscisse et U en ordonnée les différents points de mesure.
- 3 Tracer la droite qui passe au mieux par l'ensemble des points et en déduire la résistance du conducteur ohmique.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

7 Pont de Wheastone

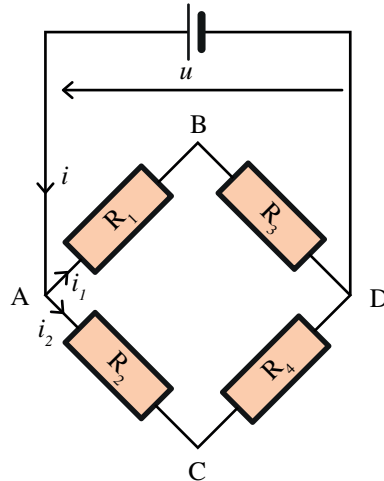


40 min

Corrigé
p. 45

Lycée Passy-St Nicolas, Buzenval

Pour déterminer la valeur inconnue d'une résistance, on peut utiliser la méthode dite du *pont de Wheastone*, grâce au circuit ci-après.



Le générateur fournit une tension constante $U = U_{AD} = 12 \text{ V}$.

À l'aide d'un voltmètre, on mesure la différence de potentiel entre les points B et C. Les paramètres R_1 , R_2 , R_3 et R_4 désignent les résistances des quatre conducteurs ohmiques qui apparaissent sur la figure.

1 Montrer que si $U_{BC} = 0$, il existe une relation très simple entre R_1 , R_2 , R_3 et R_4 .

- 2 Les résistances R_1 , R_2 et R_3 sont réglables, tandis que R_4 est la résistance inconnue que l'on souhaite déterminer. On trouve expérimentalement que $U_{BC} = 0$ si $R_1 = 1984 \Omega$, $R_2 = 1515 \Omega$ et $R_3 = 182,3 \Omega$.
- (a) Calculer R_4 .
- (b) Calculer alors l'intensité du courant i dans la maille principale.

8 Étude d'un circuit



20 min

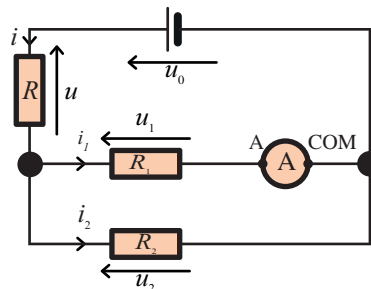
Corrigé
p. 47

Lycée Louis-le-Grand, Paris

On considère le circuit représenté page suivante.

On donne $R_2 = 100 \Omega$, $R = 50 \Omega$ et $u_2 = 4,0 \text{ V}$. L'ampèremètre indique une valeur de 100 mA .

- 1 Déterminer la valeur de i_2 .
- 2 En déduire la valeur de i puis celle de u .
- 3 Quelle est la valeur de la tension u_0 aux bornes du générateur ?



LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

9 Détecteur de fumée

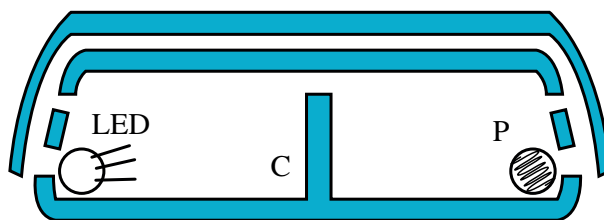


15 min

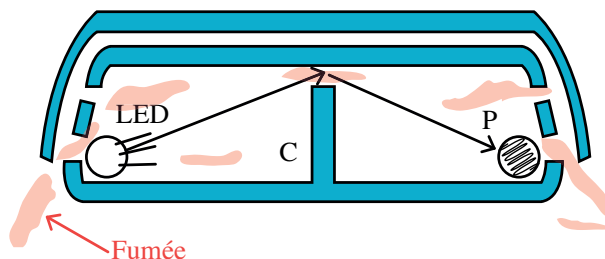
Corrigé
p. 48

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

Le principe d'un détecteur de fumée est le suivant. On place une photorésistance P et une diode électroluminescente (LED) dans une cavité où la lumière extérieure ne peut pas pénétrer. Une cloison C empêche la lumière de la LED d'arriver directement sur la photorésistance.



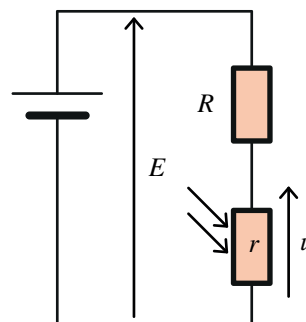
Lorsque de la fumée atteint ce détecteur, elle rentre par les trous et se répand à l'intérieur de la cavité. Des rayons lumineux issus de la LED sont alors diffusés par la fumée en direction de la photorésistance : celle-ci reçoit de la lumière, alors qu'elle est dans l'obscurité en l'absence de fumée (on peut faire l'analogie avec les pinces des phares d'une voiture la nuit : en général on ne les voit pas, mais si la voiture passe dans une nappe de fumée ou de brouillard –qui diffuse également la lumière– on les voit apparaître).



Nous admettons qu'en première approximation la résistance de la photorésistance peut s'écrire :

$$r = \frac{1,2 \times 10^5}{I}$$

où r est en ohm et I est l'illumination, dans une unité appelé lux (de symbole lx). Nous intégrons la photorésistance à un montage avec pont diviseur de tension comme représenté ci-contre :



Un circuit, non représenté ici, mesure en permanence la tension u et déclenche une alarme sonore quand sa valeur est compatible avec la présence de fumée. On souhaite que l'alarme se déclenche si la photorésistance reçoit une illumination d'au moins 0,10 lx.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 1 On donne $R = 1,0 \text{ M}\Omega$ et $E = 5,0 \text{ V}$. Pour quelle valeur critique u_c de la tension u l'alarme doit-elle se déclencher ?
- 2 L'alarme doit-elle se déclencher pour $u > u_c$ ou pour $u < u_c$?

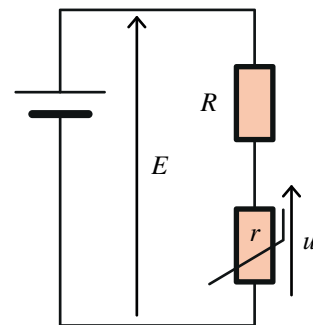
10 Chaîne du froid



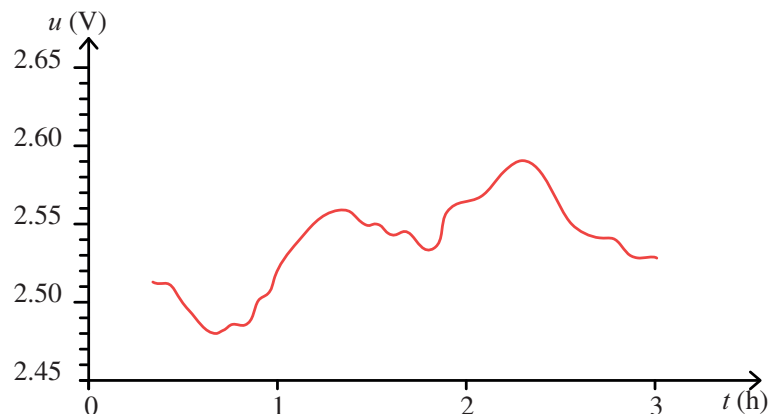
15 min

Corrigé
p. 49

Des aliments sont acheminés dans un container réfrigéré. À aucun moment du transport leur température ne doit dépasser $+2^\circ\text{C}$. Un enregistreur électronique se trouve dans le container. Il contient une thermistance et un circuit avec pont diviseur de tension, selon le schéma ci-contre :



La tension u en fonction du temps, au cours du transport, a l'allure suivante :



On admet que sur la plage de températures auxquelles est soumis l'enregistreur, la résistance de la thermistance a l'expression suivante :

$$r = 200 - 4,00 \times T$$

où r est en ohm et T en degré Celsius.

- 1 Quelles sont les températures minimale et maximale auxquelles les aliments ont été soumis ?
- 2 La chaîne du froid a-t-elle été respectée ?

Données : $E = 5,00 \text{ V}$ et $R = 200 \Omega$.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

1 **QCM** Testez vos connaissances

Énoncé
p. 35

- 1 Réponse **c** : c'est le ohm (symbole : Ω).
- 2 Réponse **b** : $R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0,1} = 30 \Omega$, contre 6Ω pour la réponse **a**.
- 3 (a) *Vrai.* $U = RI$ donc si $U = 0$ alors $I = 0$ (pour une résistance non nulle du conducteur ohmique).
(b) *Vrai.* $U = \frac{I}{G}$. Comme la conductance est au dénominateur, plus elle augmente, plus I doit diminuer pour garder le rapport constant.
- 4 Réponse **b** : $U = R \times I = 50 \times 0,2 = 10 \text{ V}$.

2 Étude d'un dipôle

Énoncé
p. 35

Lycée Gabriel Fauré, Paris

- 1 La caractéristique de ce dipôle étant une droite passant par l'origine, il s'agit par définition d'un conducteur ohmique.
- 2 Sa résistance est donnée par la loi d'Ohm :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{12,5 \times 10^{-3}} = 400 \Omega.$$

Sa conductance est $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{400} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ S} = 2,55 \text{ mS}$ (millisiemens).

- 3 Nous utilisons à nouveau la loi d'Ohm :

$$U = R \times I = 400 \times 50 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ V}.$$

3 Identifier les dipôles

Énoncé
p. 36

MÉTHODE

Nous commençons par les identifications les plus faciles pour réduire l'éventail des choix possibles pour les dipôles moins évidents, la diode et la diode Zener, que nous n'avons pas encore rencontrés.

À l'évidence, le dipôle numéro 2 (conducteur ohmique) correspond à la caractéristique **a**, puisqu'il s'agit d'une droite passant par l'origine.

Un interrupteur ouvert (dipôle numéro 3) se comporte comme un isolant : il ne laisse pas passer le courant, quelle que soit la tension à ses bornes. On s'attend donc à ce que sa caractéristique soit la droite d'équation $I = 0$. Ceci correspond à la caractéristique **c**.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

À l'inverse, un interrupteur fermé (dipôle numéro 5) se comporte comme un conducteur parfait, ou conducteur ohmique de résistance nulle : la tension à ses bornes est nulle quel que soit l'intensité du courant qui le parcourt. On s'attend donc à ce que sa caractéristique soit la droite d'équation $U = 0$. Ceci correspond à la caractéristique **b**.

Il nous reste donc le cas de la diode normale et de la diode Zener (dipôles numéro 1 et 4, respectivement) qui peuvent correspondre aux caractéristiques **d** et **e**.

La diode normale ne laisse pas le courant que dans un sens : on s'attend donc à ce que sa caractéristique corresponde à des valeurs de I qui ont toutes le même signe (sans quoi cela signifierait que le courant peut traverser ce dipôle dans les deux sens). C'est le cas de la caractéristique **e**, pour laquelle on a $I \leq 0$ quelle que soit la valeur de U .

Par élimination il nous reste que la caractéristique de la diode Zener doit être la caractéristique **d**. Vérifions toutefois que cette caractéristique est compatible avec les indications de l'énoncé. Les caractéristiques de ces deux diodes sont très similaires sauf sur la partie gauche : on voit que lorsque la tension est négative est suffisamment grande en valeur absolue, on a une branche verticale, qui correspond au fait que l'intensité I est non nulle : la diode laisse alors passer le courant, comme indiqué dans l'énoncé.

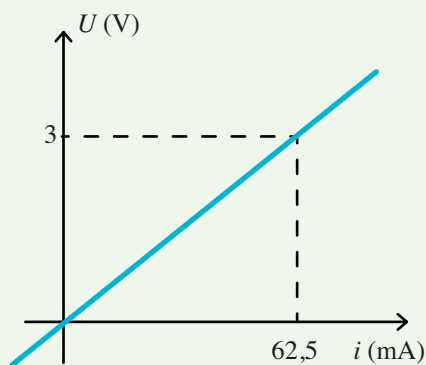
4 Conducteur ohmique

Énoncé
p. 37

Lycée Marie Curie, Sceaux



On représente ci-après la caractéristique du conducteur ohmique.



- 1 Pour connaître la valeur de la résistance, il suffit d'appliquer la loi d'Ohm au point particulier donné par l'énoncé.

On a :

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3}{0,0625} = 48 \, \Omega.$$

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

- 2 (a)** On a $P = U \times I = (R \times I) \times I = RI^2$. Ceci nous donne l'intensité en fonction de la puissance consommée dans le conducteur ohmique :

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}.$$

En particulier pour les valeurs maximales on a :

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R}} = 72 \text{ mA}.$$

- (b)** La valeur de la tension aux bornes du conducteur ohmique est alors :
 $U = R \times I_{\max} = 3,4 \text{ V}.$

MÉTHODE

Puisqu'il s'agit de valeurs maximales tolérables, les résultats sont arrondis systématiquement à la valeur inférieure, pour éviter la destruction du composant.

5 Puissance maximale

 Énoncé
p. 37

Lycée Notre-Dame, Bourg-la-Reine

Pour un conducteur ohmique, la relation donnée dans l'énoncé devient :

$$\mathcal{P} = U \times I = (RI) \times I = RI^2.$$

Donc

$$I^2 = \frac{\mathcal{P}}{R}$$

soit

$$I = \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{R}}.$$

On en déduit

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{0,250}{470}} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 23 \text{ mA}.$$

De la loi d'Ohm on déduit $U_{\max}$:

$$U_{\max} = RI_{\max} = 10,8 \text{ V}.$$

MÉTHODE

Si l'on veut arrondir ce dernier résultat pour ne garder que deux chiffres significatifs, il faut prendre 10 et non 11 puisqu'il s'agit de donner la valeur jusqu'à laquelle on peut soumettre le conducteur ohmique sans l'endommager. Annoncer 11 comme valeur maximale peut présenter un risque si l'utilisateur applique par exemple une tension de 10,9V.

COURS

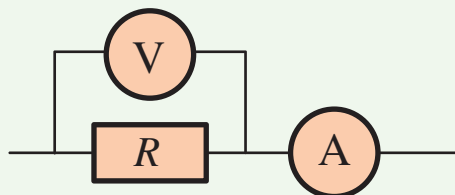
INTERROS

CORRIGÉS

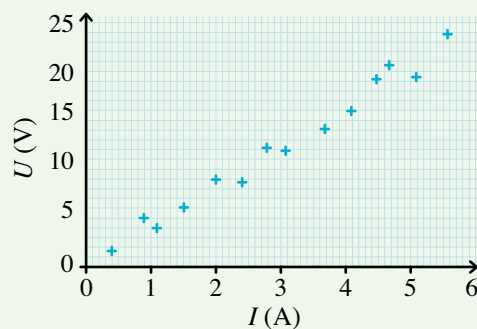
6 Nuage de points

Énoncé
p. 37

- 1 Pour mesurer la tension aux bornes du conducteur ohmique, on monte le voltmètre en dérivation, tandis que l'ampèremètre est à monter en série, comme indiqué sur la figure suivante.



- 2 Le graphe demandé a l'allure suivante :



Remarque : ce graphe peut être produit en utilisant le langage Python, de la manière suivante.



En Python

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
U = np.array ([1.6, 4.9, 4. , 6. , 8.7, 8.5, 11.9,
               11.6, 13.8, 15.6, 18.7, 20.1, 19. , 23.2])
I = np.array ([0.4, 0.9, 1.1, 1.5, 2. , 2.4, 2.8,
               3.1, 3.7, 4.1, 4.5, 4.7, 5.1, 5.6])
plt.plot (I,U,"+")
plt.xlabel ("I (A)")
plt.ylabel ("U (V)")
plt.show()
```

Suite de l'exercice page suivante.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

3 Il est possible, en utilisant le langage Python, de tracer la droite qui « passe au plus près » des points. On parle de régression linéaire par la méthode des moindres carrés. Ceci se fait en entrant, à la suite du code de la réponse précédente, les instructions suivantes :

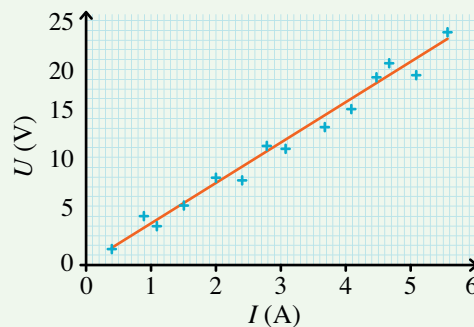


En Python

```
a,b = np.polyfit(I,U,1)
plt.plot(I,U,'+')
plt.plot(I,a*I+b)
print(a)
print(b)
plt.show()
```

On trouve $a = 3.96131611437$ et $b = 0.11577534343$. Les variables a et b sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite. On obtient alors le graphe suivant, qui inclut la droite d'équation :

$$U = aI + b.$$



Puisqu'il s'agit d'un conducteur ohmique, la droite devrait passer par l'origine et on devrait avoir $b = 0$. La valeur (non nulle) de b nous donne une idée de la précision de la méthode. La pente de la droite, c.-à-d. a , nous donne directement la valeur de la résistance. D'après le cadre ci-dessus, nous avons $a = 3.9613 \dots$ et donc :

$$R = 4,0 \, \Omega.$$

7 Pont de Wheastone

Lycée Passy-St Nicolas, Buzenval

Énoncé
p. 38

1 On suppose $U_{BC} = 0$. On peut alors écrire :

$$U_{AC} = U_{AB} + U_{BC} = U_{AB} + 0 = U_{AB}.$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Or, en utilisant la loi d'Ohm pour R_1 et R_2 :

$$U_{AB} = R_1 \times i_1 \quad \text{et} \quad U_{AC} = R_2 \times i_2,$$

donc :

$$R_1 i_1 = R_2 i_2$$

Par ailleurs nous pouvons écrire la loi d'additivité des tensions sous la forme :

$$U = U_{AD} = U_{AB} + U_{BD}$$

mais aussi sous la forme :

$$U = U_{AD} = U_{AC} + U_{CD}.$$

Nous avons donc :

$$U = U_{AB} + U_{BD} = U_{AC} + U_{CD},$$

ce qui devient, en utilisant la loi d'Ohm pour chacun des conducteurs ohmiques :

$$U = R_1 \times i_1 + R_3 \times i_1 = R_2 \times i_2 + R_4 \times i_2,$$

ou encore, après factorisation :

$$(R_1 + R_3)i_1 = (R_2 + R_4)i_2 = U$$

donc :

$$i_1 = \frac{U}{R_1 + R_3} \quad \text{et} \quad i_2 = \frac{U}{R_2 + R_4}.$$

En remplaçant ces expressions de i_1 et i_2 dans l'égalité $R_1 \times i_1 = R_2 \times i_2$ démontrée plus haut, nous obtenons :

$$\frac{R_1 U}{R_1 + R_3} = \frac{R_2 U}{R_2 + R_4}.$$

En simplifiant cette égalité par U et en formant les produits en croix nous avons :

$$R_1(R_2 + R_4) = R_2(R_1 + R_3).$$

Après avoir développé les expressions du membre de gauche et du membre de droite, on peut soustraire le terme $R_1 R_2$ qui apparaît des deux côtés du signe égal et nous obtenons la relation simple demandée :

$$R_1 R_4 = R_2 R_3.$$

C'est la condition d'équilibre d'un pont de Wheastone.

Remarque : en pratique, on connecte les points B et C par un conducteur parfait sur lequel se trouve un microampèremètre très sensible. On s'efforce, en agissant sur les résistances variables, d'obtenir un courant nul au travers du microampèremètre, ce qui assure alors que la différence de potentiel entre B et C est nulle.

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

- 2 (a) De la relation précédente, on déduit :

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1} = \frac{1515 \times 182,3}{1984} = 139,2 \, \Omega.$$

Chacune des résistances étant donnée avec quatre chiffres significatifs, nous gardons quatre chiffres significatifs pour ce résultat.

- (b) Nous utilisons pour déterminer cette intensité les résultats intermédiaires trouvés à la réponse précédente, qui nous donnent i_1 et i_2 en fonction de la tension U , laquelle est donnée dans l'énoncé, et des résistances, qui sont désormais toutes connues. Puis nous appliquons la loi des nœuds en A pour écrire :

$$i = i_1 + i_2 = \frac{U}{R_1 + R_3} + \frac{U}{R_2 + R_4} = 0,0128 \, \text{A} \approx 13 \, \text{mA}.$$

MÉTHODE

Certes les valeurs des résistances sont connues avec quatre chiffres significatifs, mais celle de U n'est donnée, dans l'énoncé, qu'avec deux chiffres significatifs. Nous gardons donc deux chiffres significatifs pour ce résultat.

8 Étude d'un circuit

Lycée Louis-le-Grand, Paris

→ Énoncé
p. 38

- 1 Les flèches de i_2 et u_2 sont de sens opposé, donc la loi d'Ohm pour le conducteur ohmique de la branche du bas s'écrit :

$$u_2 = R_2 \times i_2$$

soit

$$i_2 = \frac{u_2}{R_2}.$$

L'application numérique donne :

$$i_2 = \frac{4,0}{100} = 40 \, \text{mA}.$$

On garde deux chiffres significatifs pour le résultat puisque c'est la précision avec laquelle est donnée u_2 .

- 2 Nous appliquons à présent la loi des nœuds au nœud présent sur la branche gauche. À ce nœud arrive un seul courant, d'intensité i , tandis que deux courants partent du nœuds, d'intensités respectives i_1 et i_2 . La loi des nœuds s'écrit donc ici :

$$i = i_1 + i_2.$$

Nous connaissons la valeur de i_2 . Qu'en est-il de i_1 ? L'ampèremètre est situé dans la branche où circule le courant d'intensité i_1 .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Il mesure donc cette intensité : $i_1 = 100 \text{ mA}$, et nous avons par conséquent :

$$i = 100 + 40 = 140 \text{ mA}.$$

Nous pouvons à présent appliquer la loi d'Ohm au conducteur ohmique de la branche de gauche. Les flèches du courant et de tension sont de sens opposé, donc la loi d'Ohm s'écrit :

$$u = R \times i.$$

L'application numérique donne :

$$u = 50 \times 0,14 = 7,0 \text{ V}.$$

- 3** Nous écrivons la loi des mailles dans la maille correspondant à la partie extérieure du circuit. Les tensions qui vont dans le sens des aiguilles d'une montre sont u et u_2 , celle qui va dans le sens contraire est u_0 . Nous avons donc :

$$u_0 = u + u_2.$$

L'application numérique donne :

$$u_0 = 7,0 + 4,0 = 11,0 \text{ V}.$$

9 Détecteur de fumée

Énoncé
p. 39

live

- 1** Lorsque l'alarme se déclenche, la résistance de la photorésistance vaut :

$$r = \frac{1,2 \times 10^5}{0,1} = 1,2 \times 10^6 \Omega.$$

Évaluons la tension u dans ces conditions. La loi des mailles nous donne :

$$E = u + u',$$

où u' est la tension aux bornes du conducteur ohmique de résistance R . On peut écrire la loi d'Ohm aux bornes de ce conducteur ohmique et aux bornes de la photorésistance. Elle s'écrit respectivement :

$$u = r_c i$$

et

$$u' = Ri$$

où i est l'intensité du courant circulant dans le circuit. On a donc :

$$E = (R + r)i.$$

En divisant cette égalité membre à membre avec l'égalité $u = ri$, on obtient :

$$u = \frac{r}{R + r} E.$$

L'application numérique donne :

$$u = \frac{1,2 \times 10^6}{1,2 \times 10^6 + 10^6} \times 5,0 = 2,7 \text{ V}.$$

LES DIPÔLES ÉLECTRIQUES • CHAP. 3

La valeur de la tension critique est $u_c = 2,7 \text{ V}$.

- 2** On a vu que $E = u + u'$. Un calcul similaire à celui ci-dessus permet d'obtenir :

$$u' = \frac{R}{R + r} E.$$

On voit donc que u' est une fonction décroissante de r , et qu'ainsi u est une fonction croissante de r , puisque leur somme est constante et vaut E . Lorsque l'illumination de la photorésistance est supérieure au seuil de $0,1 \text{ lx}$, l'alarme doit sonner, puisque cela signifie qu'il y a de la fumée dans le détecteur.

D'après la formule donnée dans l'énoncé, la résistance est inversement proportionnelle à l'illumination, donc la résistance r est alors plus petite que la résistance critique évaluée à la question précédente. En vertu de ce qui précède, u est donc inférieure à u_c . L'alarme doit sonner pour $u < u_c$.

10 Chaîne du froid

→ Énoncé
p. 40

- 1** On lit sur le graphe les valeurs maximale et minimale de la tension u au cours du temps :

$$u_{\max} = 2,59 \text{ V}$$

et

$$u_{\min} = 2,48 \text{ V}.$$

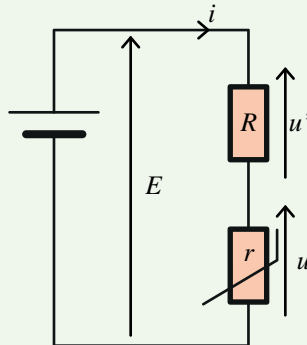


Pour en déduire les températures extrêmes atteintes par l'enregistreur, il nous faut utiliser la formule donnée dans l'énoncé, et pour cela déterminer la résistance r . Il nous faut donc trouver r en fonction de u .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Nous écrivons la loi des mailles : $E = u + u'$
et la loi d'Ohm aux bornes des deux conducteurs ohmiques :

$$u = ri \quad \text{et} \quad u' = Ri$$

donc : $E = (R + r)i$.

On remplace i par u/r dans cette expression, et obtenons, après multiplication des deux membres de l'égalité par r :

$$Er = (R + r)u$$

soit : $r(E - u) = Ru$

donc : $r = \frac{u}{E - u} R$.

On en déduit les valeurs de la résistances pour $u = u_{\min}$ et $u = u_{\max}$.
Elles sont respectivement :

$$r_{\min} = \frac{2,48}{5,00 - 2,48} \times 200 = 197 \, \Omega$$

et

$$r_{\max} = \frac{2,59}{5,00 - 2,59} \times 200 = 215 \, \Omega.$$

De l'expression donnée dans l'énoncé, nous pouvons déduire :

$$T = \frac{200 - r}{4}.$$

En effectuant l'application numérique, nous obtenons :

$$T_{\max} = \frac{200 - r_{\min}}{4} = 0,750 \, ^\circ\text{C} \quad \text{et} \quad T_{\min} = \frac{200 - r_{\max}}{4} = -3,75 \, ^\circ\text{C}.$$

MÉTHODE

Notons que puisque T est une fonction décroissante de r , à $r_{\min}$ correspond $T_{\max}$ et vice-versa.

- 2** Nous voyons que la température maximale atteinte au cours du transport est inférieure à la température maximale admissible. Par conséquent la chaîne du froid a été respectée.

Chapitre

4

Signaux périodiques et sons

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. L'oscilloscope
4. Les ondes sonores
5. Notions d'acoustique

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 59

Ce chapitre introduit la notion de signaux périodiques. Il présente l'un des outils d'étude de tels signaux : l'oscilloscope. Nous abordons ensuite la notion d'onde sonore et présentons quelques notions d'acoustique.

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.

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; $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$), le mégahertz (symbole MHz; $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$), et le gigahertz (symbole GHz; $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$).

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

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

Nous aurions 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.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

3 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.

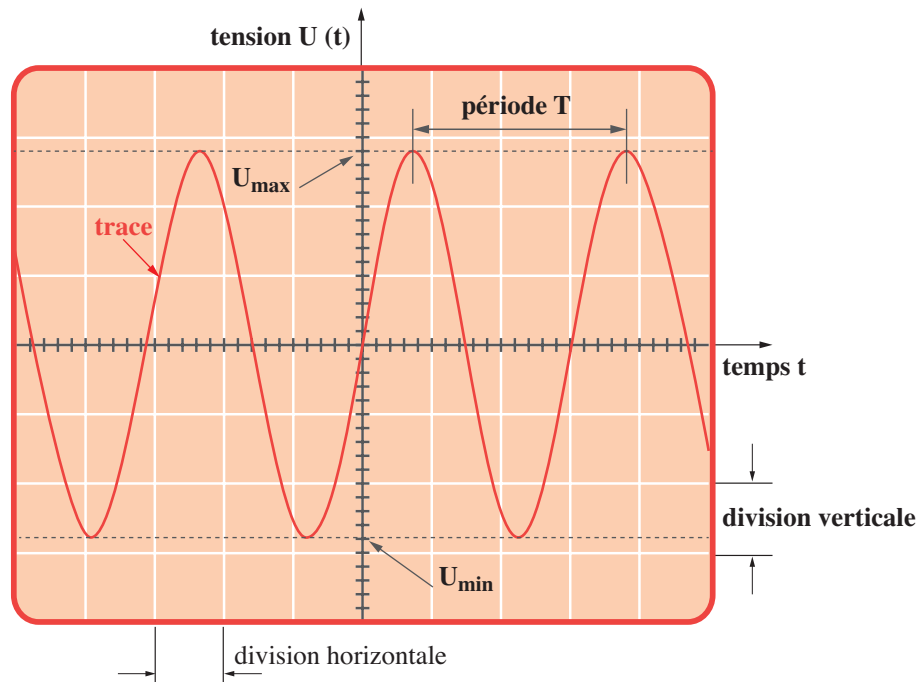


Figure 4.1 – La trace de l'oscilloscope donne une représentation de la tension en fonction du temps.

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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.

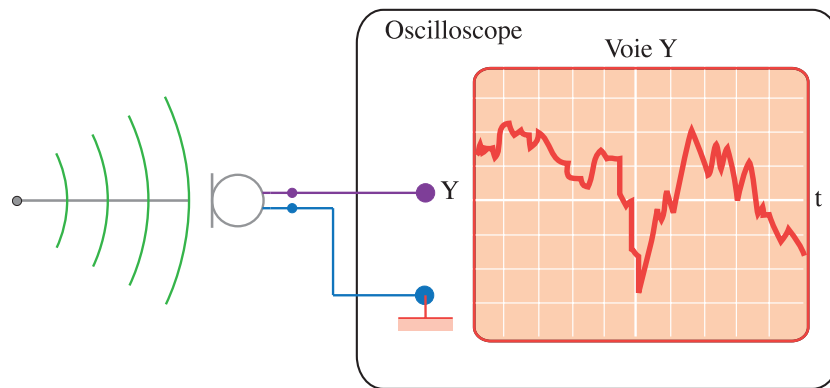
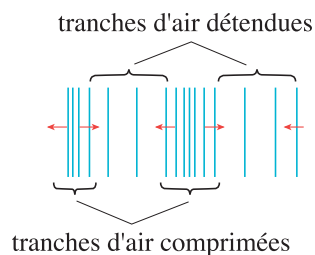


Figure 4.2 – Allure de la tension variable aux bornes du microphone.

4 Les 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 ;

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

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

4.1 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 localiser une proie (technique utilisée par la chauve-souris ou le dauphin).

5 Notions d'acoustique

5.1 Intensité d'une onde sonore

Définition 3

On appelle intensité d'une onde sonore la puissance transportée par l'onde par unité de surface.

Si on note I l'intensité de l'onde, P la puissance qu'elle transporte à travers une surface S , alors :

$$I = \frac{P}{S}$$

Unités : dans le Système International, P est en watt, S en mètre carré (m^2) et I en watt par mètre carré (W.m^{-2}).

La plus petite intensité sonore que peut capter l'oreille humaine est :

$$I_{\min} = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2},$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

et la plus grande intensité acceptable (correspondant au seuil de la douleur) est :

$$I_{\max} = 0,1 \text{ W.m}^{-2}.$$

On remarque la grande sensibilité du tympan, ainsi que son extraordinaire dynamique (qui est le rapport $\frac{I_{\max}}{I_{\min}} = 10^{11}$). Il y a onze ordres de grandeur entre la plus grande intensité sonore acceptable et la plus petite que peut détecter l'oreille !

5.2 Niveau sonore et décibels

Pour manipuler des nombres qui ne soient pas trop petits ou trop grands, on introduit la notion de niveau sonore. Celui-ci correspond à une autre manière d'exprimer l'intensité sonore reçue.

À RETENIR

On ajoute 10 dB au niveau sonore quand l'intensité sonore est multipliée par 10.

L'unité de niveau sonore est le décibel, de symbole dB.

On adopte comme niveau sonore 0 dB le niveau correspondant à une intensité acoustique de $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$.

Ainsi, à une intensité acoustique de $10^{-11} = 10 \times 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ correspond un niveau sonore de 10 dB, à une intensité acoustique de :

$$10^{-10} = 10 \times 10 \times 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$$

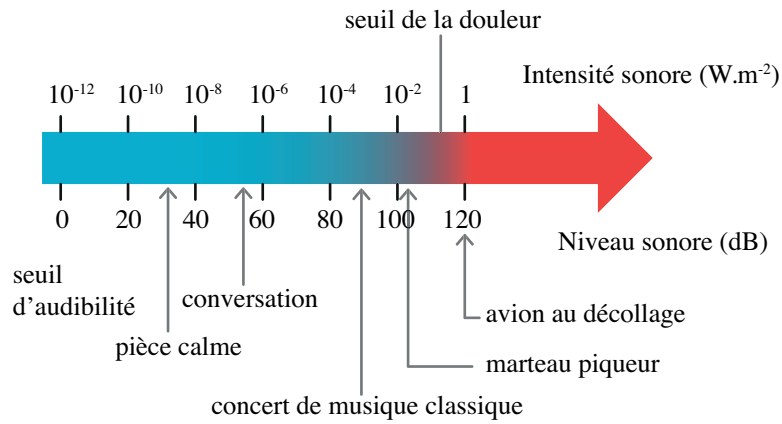
correspond un niveau sonore de $10 + 10 = 20 \text{ dB}$, etc.

Remarques

- Lorsqu'on double l'intensité sonore, on ajoute 3 dB au niveau sonore.
- Une échelle où on *ajoute* une certaine quantité lorsqu'on *multiplie* par un certain facteur le paramètre original (ici l'intensité sonore) est appelée échelle logarithmique. Son usage est particulièrement adapté pour les phénomènes physiques susceptibles de stimuler l'un des cinq sens, en vertu d'une loi physiologique approximative appelée loi de Fechner. Ainsi, en ce qui concerne la vision, on utilise en astronomie l'échelle des magnitudes, qui est également une loi logarithmique : on ajoute -5 magnitudes lorsque l'éclat d'une étoile est multiplié par 100.

Sur l'échelle représentée page ci-contre, nous reportons des niveaux sonores typiques associés à diverses situations.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

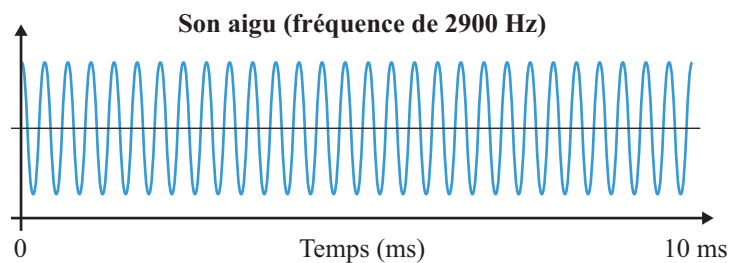
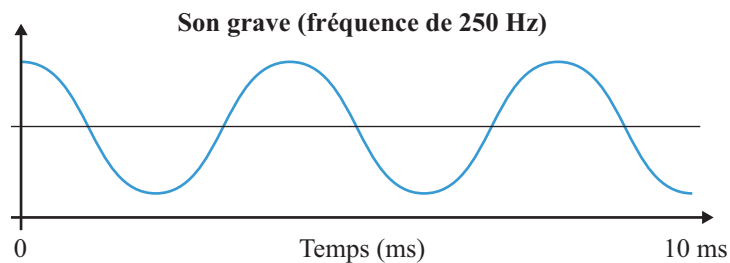


Au-delà de 80 dB, il existe un risque pour l'audition en cas d'exposition prolongée. En discothèque et au festival, le niveau sonore moyen mesuré sur 15 minutes ne doit pas dépasser 102 dB.

5.3 Hauteur et timbre d'un son

À RETENIR

Plus la fréquence d'un son est élevée, plus il est aigu. Plus sa fréquence est basse, plus il est grave.



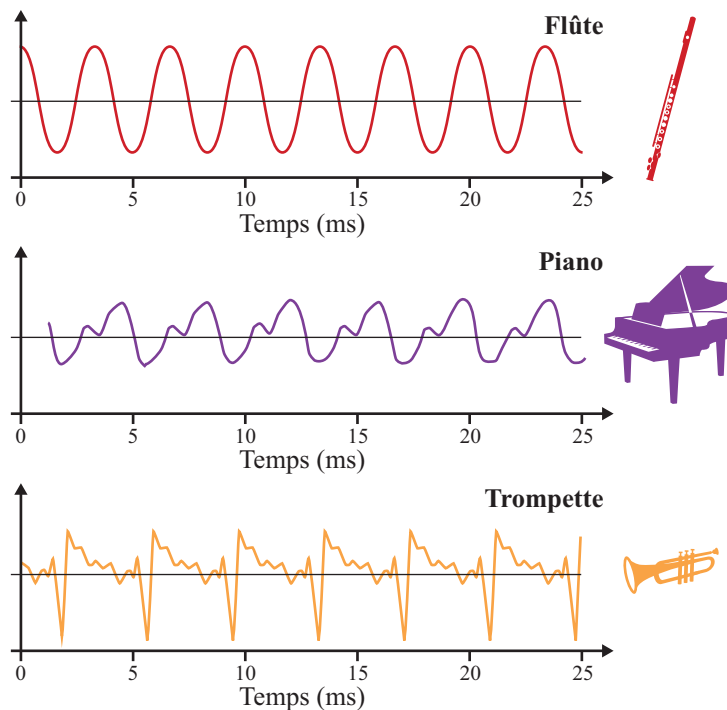
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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, ou des mammifères marins).

La variation périodique de pression associée à un son possède une certaine forme. Le timbre du son dépend de cette forme. Deux sons peuvent avoir la même hauteur mais des timbres différents : ainsi, on peut parfaitement distinguer la même note « La » jouée par une flûte, une trompette ou un piano. Les sons correspondant ont même fréquence, mais des timbres différents.



5.4 Production d'un son

Émettre un son, c'est mettre en mouvement des tranches d'air qui vont propager l'information de proche en proche par une onde sonore. Cette mise en mouvement des tranches d'air s'effectue toujours par la vibration d'un système mobile immergé dans l'air (ou dans le fluide dans lequel on émet l'onde). Les détentes et compressions successives des tranches d'air correspondent à des petites variations d'une grandeur appelée pression. La variation de cette grandeur due au passage d'une onde sonore est appelée la pression acoustique.

Nous donnons ci-après quelques exemples d'émetteurs sonores.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

La voix humaine : elle correspond à l'émission de sons dans le larynx. Les parties mobiles, que l'on fait vibrer, sont les cordes vocales, qui sont deux «rubans» situés à la base du larynx. Un ensemble de muscles permet de contrôler les cordes vocales et de moduler ainsi le son qu'elles émettent. Les ondes sonores émises passent ensuite dans une succession de cavités (conduit nasal, bouche). Par un contrôle de la forme de ces cavités, on peut moduler (notamment en timbre et hauteur) le son finalement émis.

Une cloche d'église est une surface relativement complexe mise en vibration par le choc du battant. La déformation de la cloche entraînée par ce choc donne lieu à la vibration de la surface à certaines fréquences bien déterminées, qui donnent au son de la cloche son timbre et sa hauteur.

Un haut-parleur est un dispositif qui convertit une tension électrique variable en mouvement d'une membrane, assurant ainsi l'émission d'ondes sonores par la mise en vibration des tranches d'air avoisinantes.

Une corde tendue entre deux points fixes, lorsqu'on la pince ou frappe, se met à vibrer à certaines fréquences caractéristiques. Cette vibration en elle-même est généralement insuffisante pour produire un son important. Mais, communiquée à une caisse de résonance (comme sur une guitare), elle entraîne la mise en vibration des tranches d'air, qui se propage de proche en proche, avec là-encore un timbre et une hauteur qui dépendent de la forme de la caisse de résonance, de la tension de la corde, de l'endroit où elle a été pincée, etc.

La caisse de résonance est un dispositif qui permet d'amplifier les vibrations des tranches d'air au voisinage de la source sonore (cordes de guitare, membrane de haut-parleur, etc.)

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Franco-Mexicain, Mexico

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 :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{250} = 0,004 \text{ s} = 4,00 \text{ ms.}$$

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

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Franco-Mexicain, Mexico

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

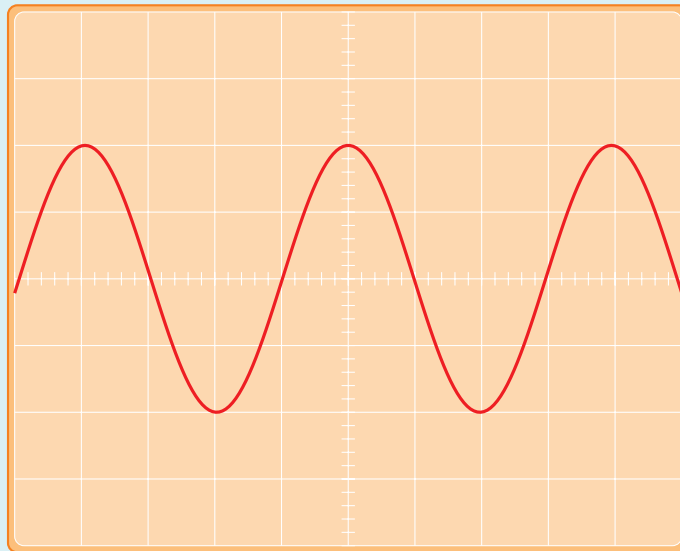


Figure 4.3 – Allure de la tension en fonction du temps.

Voir énoncé page 51

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 69

- 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 Deux sons de même hauteur ont forcément le même timbre.
☐ a vrai ☐ b faux
- 4 Plus le niveau sonore d'un son est élevé, plus il est aigu.
☐ a vrai ☐ b faux
- 5 Plus le niveau sonore d'un son est élevé, plus son intensité sonore est grande.
☐ a vrai ☐ b faux

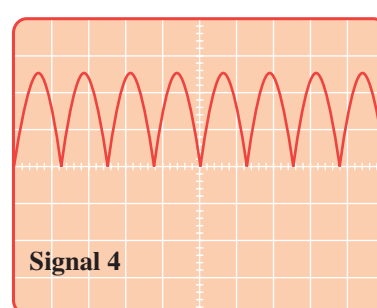
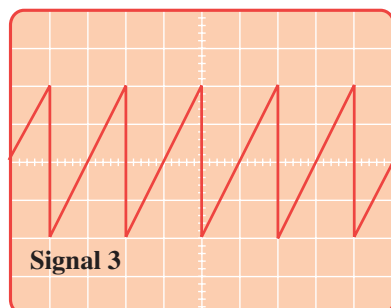
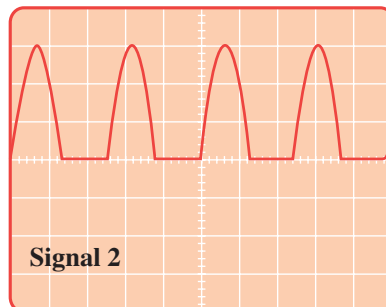
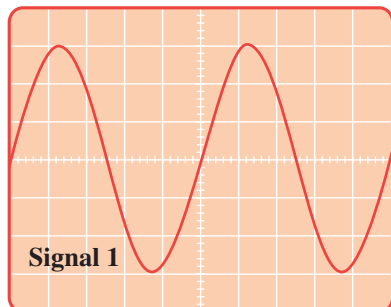
2 QCM Oscilloscope

5 min

Corrigé
p. 69

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.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 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.

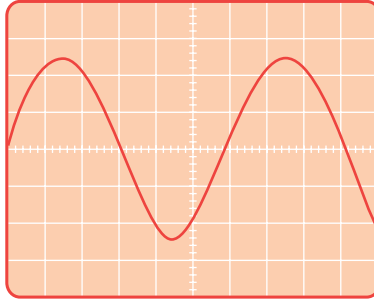
Partie B

- 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

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

3 V/F Utilisation d'un oscilloscope

10 min Corrigé p. 70



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 $0,1 \text{ ms}.\text{div}^{-1}$.

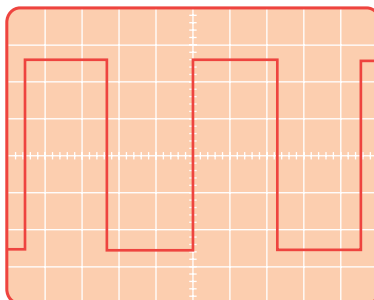
4 Étude d'un oscillogramme



10 min Corrigé p. 70

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 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.

5 Chauve-souris



5 min

Corrigé
p. 71

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

6 Sous-marin



5 min

Corrigé
p. 71

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 0,730 s après l'émission. À quelle distance du fond se trouve le sous-marin, sachant que la vitesse du son dans l'eau vaut $c_s = 1\,500 \text{ m.s}^{-1}$?

7 Vitesse du son

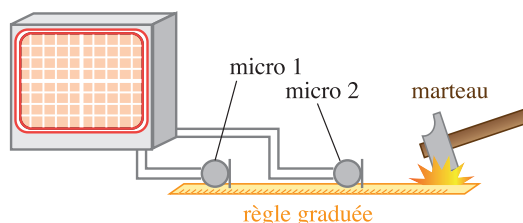


5 min

Corrigé
p. 71

Lycée Gustave Eiffel, Cachan

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

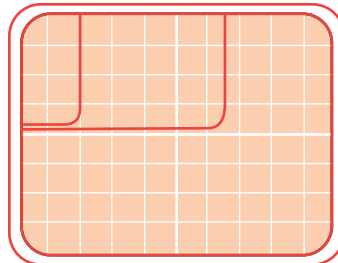


L'oscilloscope est un oscilloscope à mémoire, qui se déclenche quand un signal est détecté sur la voie 2, et qui garde à l'écran les traces obtenues.

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

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

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 ?

8 Ondes sonores



10 min

Corrigé
p. 72

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 : $c_2 = 5\,000 \text{ m.s}^{-1}$

9 Son d'une sirène



10 min

Corrigé
p. 72

Lycée Lakanal, Sceaux

Le disque d'une sirène comporte 20 trous régulièrement répartis sur sa périphérie ; il tourne devant un jet d'air à la vitesse de 3000 tours par minute. Quelle est la fréquence du son émis ?

Ce son est-il audible ? Pourquoi ?

10 Trois instruments



10 min

Corrigé
p. 73

Lycée Hoche, Versailles

Trois sources sonores (une trompette, un violoncelle et un piano) émettent la même note, le La₃, de fréquence $N = 220 \text{ Hz}$.

- Pourquoi une oreille peut-elle différencier ces instruments ?
- Rappeler comment on obtient un oscillogramme des sons. En quoi les oscillogrammes de ces sons diffèrent-ils ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

11 Son produit par une guitare

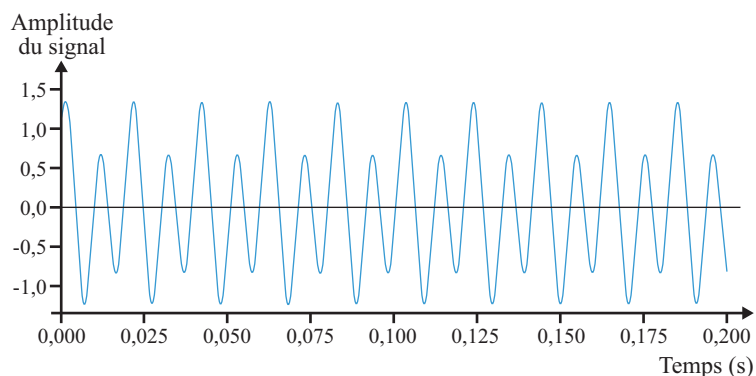


10 min

Corrigé
p. 73

Lycée Pasteur, Neuilly

On a enregistré le son produit par une guitare lorsque l'on pince une de ses cordes. Voici le signal sonore produit par la corde :



- 1 Le signal est-il périodique ?
- 2 Calculer la fréquence du signal.
- 3 Le signal sonore est-il audible par un humain ? Justifier.
- 4 Le son produit par la corde est ensuite amplifié grâce à un amplificateur et un haut-parleur. Juste à côté du haut-parleur, le niveau d'intensité sonore est de 102 dB.
 - (a) Est-ce dangereux pour un humain de se tenir près du haut-parleur ?
 - (b) Si c'est le cas, comment protéger son ouïe (sens permettant de percevoir les sons) ?

12 Préparation d'un enregistrement



20 min

Corrigé
p. 74

Nouveau programme

Un groupe de musique composé d'un chanteur, d'un guitariste, d'un violoniste et d'un bassiste se prépare à un enregistrement en studio.

Lors de la « balance » (moment préalable à un enregistrement ou un concert), l'ingénieur du son réalise séparément pour chaque instrument des enregistrements à l'aide de micros reliés à un système informatisé.

La tension électrique détectée au niveau de l'interface informatique, notée U_{AM} , est proportionnelle à la pression acoustique du son (laquelle croît avec l'intensité sonore). Cette tension en fonction du temps est représentée sur les divers documents ci-après.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

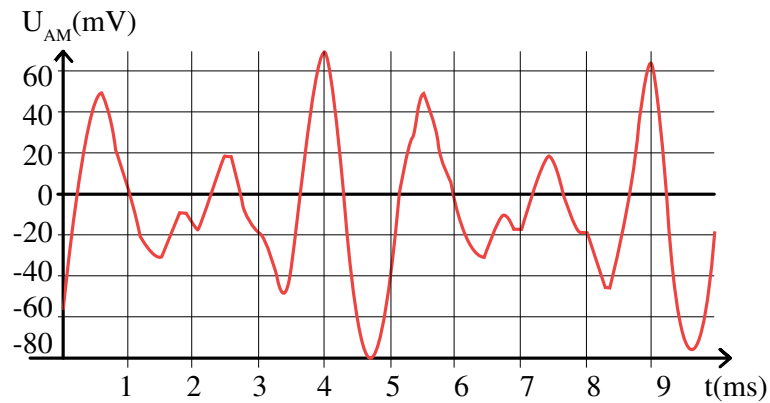


Figure 4.4 – Document 1 : enregistrement numérique d'un son de la guitare

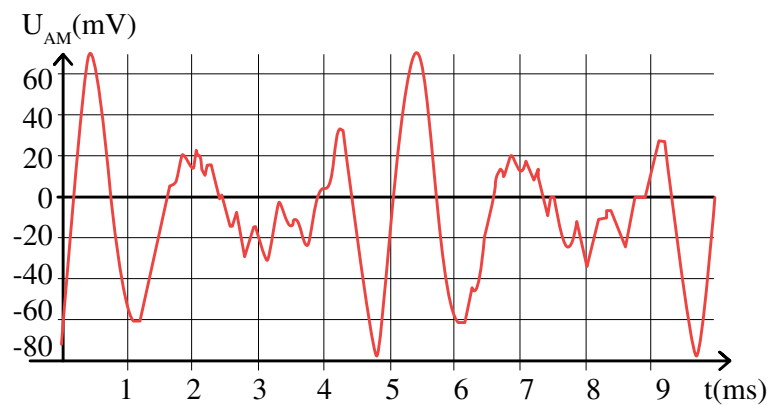


Figure 4.5 – Document 2 : enregistrement numérique d'un son de la basse

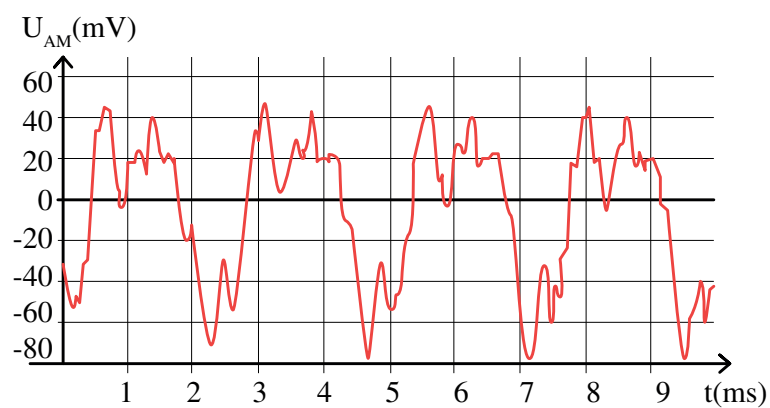


Figure 4.6 – Document 3 : enregistrement numérique d'un son du violon

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 1 Décrire le principe de l'émission d'un son par la corde d'une guitare.
- 2 Citer les domaines de fréquences des sons audibles, des infrasons et des ultrasons.
- 3 À partir du document 1, déterminer la période de la note jouée par la guitare. En déduire sa fréquence.
- 4 Un son de basse (document 2) a été enregistré dans les mêmes conditions que celui de la guitare. Quelle est la caractéristique commune des deux sons enregistrés ? Nommer la grandeur physique associée à cette caractéristique.
- 5 Quelle caractéristique permet de distinguer ces deux sons ?
- 6 La note émise par le violon (document 3) est-elle plus ou moins aiguë que celle émise par la guitare ? Justifier.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 61

- 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 **b**. La notion de timbre est indépendante de celle de hauteur (ou fréquence)
- 4 **b**. Niveau sonore et hauteur sont des notions indépendantes.
- 5 **a**. Niveau et intensité sonores sont deux échelles décrivant la même réalité physique.

2 QCM Oscilloscope

Énoncé
p. 61

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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** Utilisation d'un oscilloscope

Énoncé
p. 63

- 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 $0,1 \text{ ms.div}^{-1}$.

4 Étude d'un oscillogramme

Énoncé
p. 63

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 :

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

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.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

5 Chauve-souris

Énoncé
p. 64

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 vitesse du son dans l'énoncé. Le délai séparant émission et réception est donc de 5,9 millisecondes.

6 Sous-marin

Énoncé
p. 64

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 $\Delta t = 0,730 \text{ s}$. On doit donc écrire :

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

soit :

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

7 Vitesse du son

Énoncé
p. 64

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 $\left(c_s = \frac{d}{t}\right)$.
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 :

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

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

C'est donc le temps que met le son pour parcourir la distance $d = 0,78$ 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 $c_s = 3,5 \cdot 10^2 \text{ m.s}^{-1}$.

8 Ondes sonores

Énoncé
p. 65

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 :

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

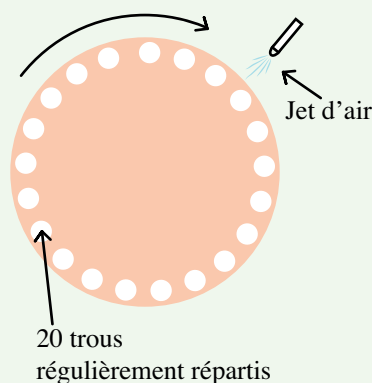
On en déduit :

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

9 Son d'une sirène

Énoncé
p. 65

Lycée Lakanal, Sceaux



Le son émis correspond à $3000 \times 20 = 60000$ vibrations par minute. il y a 3000 rotations du disque par minute, et vingt vibrations de l'air par rotation.

SIGNAUX PÉRIODIQUES ET SONS • CHAP. 4

Pour avoir la fréquence en hertz, il suffit de rechercher combien il y a de vibrations par seconde. Il y en a 60 fois moins, et donc la fréquence vaut :

$$f = \frac{60000}{60} = 1000 \text{ Hz.}$$

Le son émis a donc une fréquence de 1000 Hz. C'est un son audible et relativement aigu. Notons que lorsqu'on arrête la sirène, le disque ralentit progressivement et le son devient donc de plus en plus grave, puisque sa fréquence baisse.

10 Trois instruments

→ Énoncé
p. 65

Lycée Hoche, Versailles

- 1 Une oreille peut différencier ces instruments, bien qu'ils jouent la même note, parce qu'ils ont des timbres différents, c'est-à-dire que l'allure des variations de la pression acoustique sur une période de temps n'est pas la même pour chacun d'eux.
- 2 On obtient un oscillogramme de ces sons en reliant un microphone à un oscilloscope en mode balayage.
Les oscillogrammes des trois instruments diffèrent par l'allure de la courbe sur une période, bien que leurs périodes soient égales (ils jouent tous le La₃).

11 Son produit par une guitare

→ Énoncé
p. 66

Lycée Pasteur, Neuilly

- 1 Ce signal se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps réguliers. Il s'agit donc d'un signal périodique.
- 2 On peut déterminer graphiquement la période T de ce signal : $T = 0,02$ s.
On en déduit sa fréquence grâce à la formule :
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ Hz.}$$
- 3 Les sons audibles par un humain ont des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Ce son est donc bien audible par un humain.
- 4 (a) Une exposition prolongée à un niveau d'intensité sonore de plus de 80 dB présente un risque.
102 dB correspond au seuil maximal autorisé en discothèque et en festival pour un public adulte. Se tenir proche du haut parleur de manière prolongée est donc dangereux et expose à une perte d'audition définitive.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- (b) Pour se protéger, on peut utiliser des bouchons d'oreilles. Certains, spécialement conçus pour les musiciens, permettent de diminuer l'intensité sonore reçue par l'oreille tout en préservant la qualité du son.

12 Préparation d'un enregistrement

Énoncé
p. 66

Nouveau programme

- 1 Le fait de pincer une corde de guitare la fait vibrer à une fréquence donnée et avec un timbre caractéristique. Ces vibrations se transmettent à la caisse de résonance, qui met en vibration à son tour les couches d'air environnantes, déclenchant l'émission du son.
- 2 Les sons audibles ont une fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz. Les infrasons ont une fréquence inférieure à 20 Hz, tandis que les ultrasons ont une fréquence supérieure à 20 kHz.
- 3 Nous voyons sur le document 1 que le signal se reproduit identique à lui-même au bout d'un temps $T = 5$ ms.

MÉTHODE

Pour déterminer la période, il suffit d'identifier une partie caractéristique du signal et de voir au bout de combien de temps elle se répète. Nous pouvons ainsi voir que le « pic » correspondant au maximum de la tension U_{AM} a lieu à $t = 4$ ms, puis se répète à $t = 9$ ms.

La fréquence se déduit de la période T par :

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

On veille à exprimer la période dans l'unité du Système International (s) avant d'effectuer le calcul.

- 4 Nous remarquons que la période du signal de la basse est également $T = 5$ ms (les pics ont lieu à $t = 0,5$ ms et $t = 5,5$ ms). Les deux sons ont donc même période et par conséquent même fréquence. Ils ont donc la même hauteur.
- 5 L'allure de la tension sur une période $T = 5$ ms est très différente pour la guitare et pour la basse. Les sons correspondant, bien qu'ayant la même hauteur, ont donc des timbres différents. Ceci permet à l'oreille de les distinguer.
- 6 La période du signal du document 3 est manifestement inférieure à T . Si l'on regarde à présent le minimum de la tension, on voit qu'il a lieu successivement à $t \approx 2,3$ ms, $t \approx 4,7$ ms puis $t \approx 7,1$ ms. La période est donc d'environ 2,4 ms, donc la fréquence est plus élevée que celle de la guitare ou de la basse. Le son du violon est donc plus aigu.

Réflexion et réfraction de la lumière

Plan du chapitre

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

1 Introduction

Exercice type

Lycée Henri IV, Paris

On considère le prisme ci-dessous (d'indice de réfraction 1,58), plongé dans l'eau (d'indice de réfraction 1,33). Tracer la marche du rayon lumineux. On tiendra compte d'éventuels rayons réfléchis.

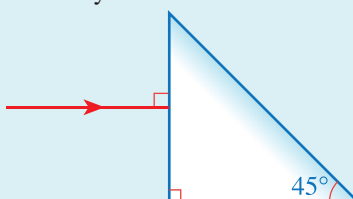


Figure 5.1 – Le rayon arrive avec une incidence normale sur la face gauche du prisme.

Voir corrigé page 78

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 correspond à un ensemble de rayons lumineux.

Définition 1

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.

À RETENIR

La vitesse de la lumière dans le vide est notée c .
Elle vaut environ $300\,000\text{ km.s}^{-1}$ ($3 \times 10^8\text{ km.s}^{-1}$).

Il s'agit d'une vitesse considérable, largement supérieure à d'autres vitesses couramment rencontrées au cours du programme de Seconde, telles que la vitesse du son, la vitesse d'objets dans le référentiel terrestre, ou même la vitesse de planètes dans le référentiel héliocentrique.

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 : $n = 1$.

Définition 2

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

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

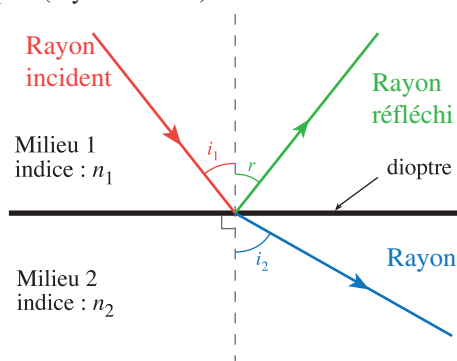


Figure 5.2 – Notations relatives aux différents rayons. On a ici $n_2 < n_1$.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

Définition 3

On appelle normale au dioptre la droite perpendiculaire au dioptre.

Définition 4

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

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

3 Réflexion de la lumière

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

Lorsque la réflexion a lieu sur un dioptre, elle peut être partielle, et une partie de rayon peut également être réfractée : elle passe au travers du dioptre 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 :

$$n_1 \times \sin(i_1) = n_2 \times \sin(i_2).$$

Remarque : 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 au-delà duquel le rayon réfracté ne peut plus exister. Dans ce cas-là, seul le rayon réfléchi existe.

Définition 5

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

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : le verre est dispersif. C'est pourquoi un prisme de verre disperse la lumière blanche suivant ses différentes longueurs d'onde. Nous retrouverons en exercice des applications de la dispersion à la décomposition de la lumière blanche.

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Henri IV, Paris

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 déterminer quels sont les rayons réfracté et réfléchi.

Nous appelons i l'angle du rayon réfracté. En écrivant la loi de Snell-Descartes relative à la réfraction, on a :

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

soit

$$\sin i = \frac{1,58 \times \sin 45}{1,33}$$

qui donne tous calculs faits :

$$i = 57^\circ.$$

⚠ 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. En cas de doute, un moyen est de vérifier que « $\sin 90^\circ$ » donne bien 1 comme résultat.

Par ailleurs le rayon réfléchi forme un angle de 45° avec la normale au dioptre, et part donc verticalement en direction de la face inférieure, qu'il atteint avec une incidence normale. Il traverse donc le dioptre inférieur sans être dévié. Ce rayon est représenté en pointillés sur la figure ci-après.

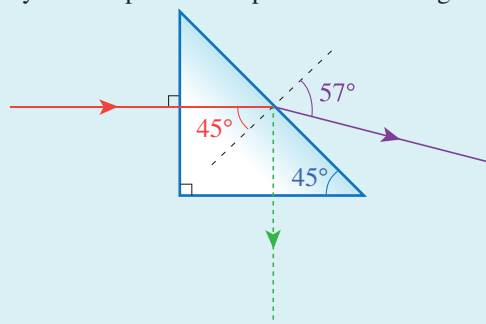


Figure 5.3 – Le rayon incident sur la face oblique du prisme donne lieu à un rayon réfléchi et un rayon transmis.

Voir énoncé page 75

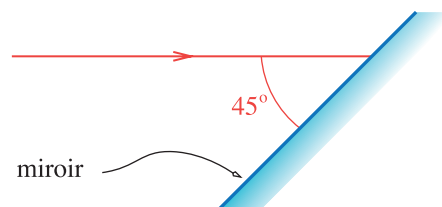
RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 87

- 1 Sur un miroir, les rayons lumineux se :
☐ a) réfractent ☐ b) réfléchissent
- 2 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 :



- 3 Dans un milieu dispersif, la vitesse de la lumière
- ☐ a) dépend de la longueur d'onde
 - ☐ b) dépend de l'angle d'incidence
 - ☐ c) est égale à la vitesse de la lumière dans le vide

2 Marche d'un rayon



5 min

Corrigé
p. 87

Lycée Janson de Sailly, Paris

Tracer la marche des rayons transmis et réfléchi.

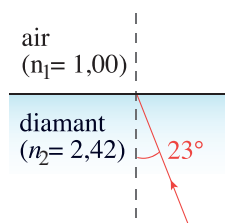


Figure 5.4 – Le rayon arrive sur le dioptre diamant/air avec une incidence de 23° .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3 Compléter les phrases



5 min

Corrigé
p. 87

Lycée Jacques Decour, Paris

- 1 Le changement de direction que subit la lumière lorsqu'elle change de milieu de propagation est appelé
- 2 Pour une radiation donnée, un milieu transparent est caractérisé par un nombre appelé
- 3 L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon incident et la au dioptre.

4 Dioptre air-eau



5 min

Corrigé
p. 88

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 $n_2 = 1,33$.

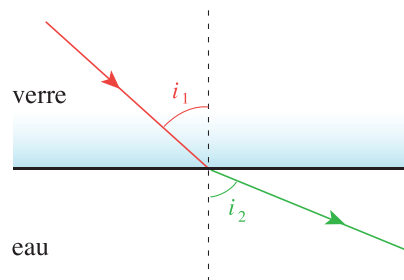


Figure 5.5 – Le rayon est réfracté au franchissement du dioptre verre/eau.

Pour quelle valeur i_1 de l'angle d'incidence l'angle de réfraction i_2 vaut-il 60 degrés ?

5 Cuve à réfraction



10 min

Corrigé
p. 88

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.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

6 Projecteur dans un bassin



10 min

Corrigé
p. 89

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 $h = 0,80$ m. L'indice de réfraction de l'eau est égal à $n = 1,33$.

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.

7 Marche d'un rayon



10 min

Corrigé
p. 89

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

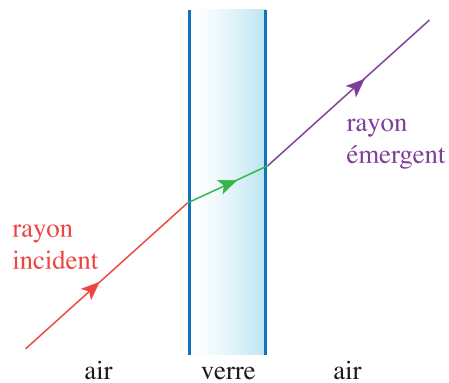


Figure 5.6 – Rayon lumineux incident sur une lame à faces parallèles.

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.

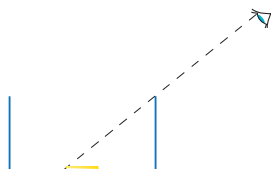
8 Réfraction



10 min

Corrigé
p. 90

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 ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

9 Aquarium



10 min

Corrigé
p. 90

Lycée du Parc des Loges, Évry

Une source lumineuse étanche se trouve au fond d'un aquarium. Elle émet un rayon 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 :

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

10 Profondeur apparente d'une piscine



15 min

Corrigé
p. 91

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry



Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

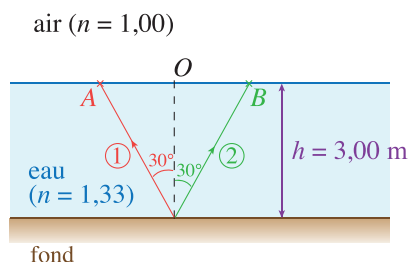


Figure 5.7 – Les deux rayons 1 et 2 sont issus d'un même point du fond de la piscine.

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 ?

11 Spectre de la lumière blanche



15 min

Corrigé
p. 92

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 page ci-contre.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

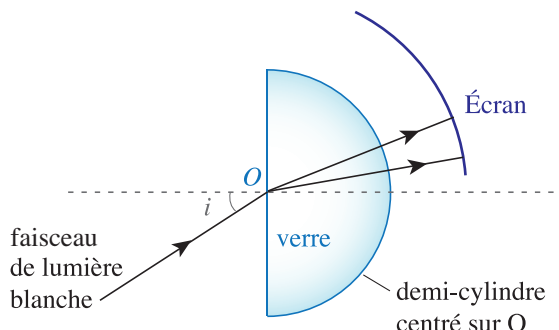


Figure 5.8 – Le faisceau arrive sur le demi-cylindre avec une incidence non nulle.

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 ?

12 Étude d'un prisme simplifié



20 min

Corrigé
p. 93

Lycée Montaigne, Bordeaux

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

$$n(\lambda) = 1,200 + \frac{70,00}{\lambda}$$

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

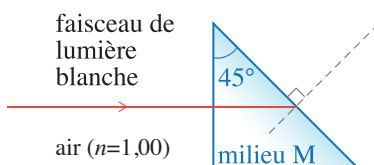


Figure 5.9 – Le faisceau arrive sur le prisme sous incidence normale.

- 1 Que contient la lumière blanche ?
- 2 On considère, parmi toutes les ondes que véhicule la lumière blanche, une onde de longueur d'onde $\lambda_a = 650,0 \text{ nm}$. 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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 3 On considère à présent, parmi toutes les ondes que véhicule la lumière blanche, une onde de longueur d'onde $\lambda_b = 400,0 \text{ nm}$. 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 ?

13 Réfraction atmosphérique



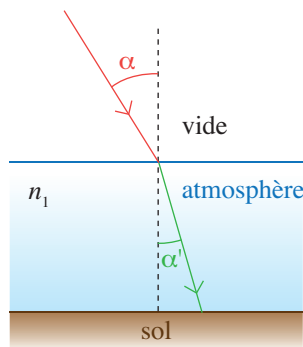
20 min

Corrigé
p. 94

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.

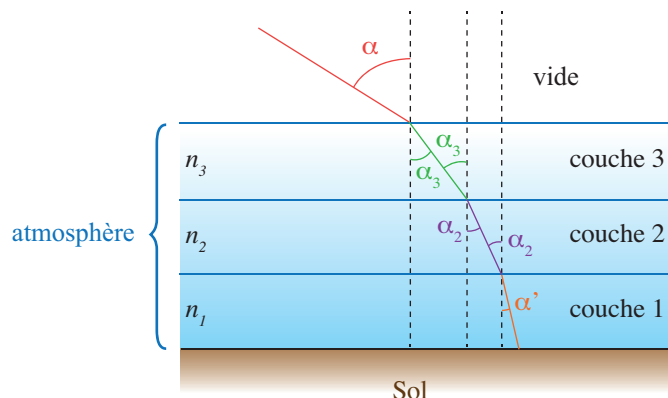
- 1 On considère dans un premier temps que l'atmosphère est une couche d'air homogène d'indice $n_1 = 1,0003$.



- (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 (voir figure page ci-contre).

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

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5



14 Angle de Brewster



20 min

Corrigé
p. 95

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*).

15 Dispersion par un demi-cylindre



30 min

Corrigé
p. 96

Lycée Arago, Paris

On dispose d'un demi-cylindre d'un matériau transparent. Ce matériau est caractérisé par la courbe représentée ci-dessous.

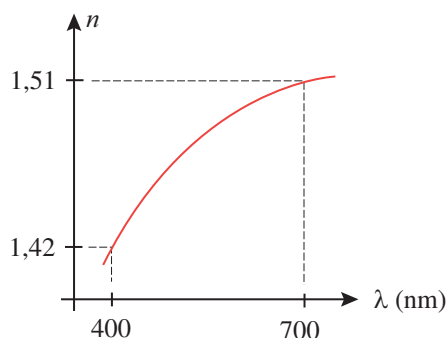


Figure 5.10 – Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

- 1 Ce matériau est-il dispersif ? Justifier.
- 2 Donner une estimation de la vitesse de propagation de la lumière violette ($\lambda = 400$ nm) dans ce milieu.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 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 degrés 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 ?

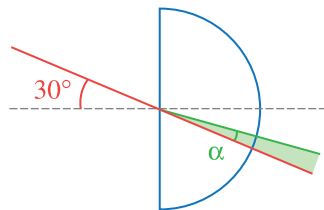


Figure 5.11 – Angle d'ouverture du spectre.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 79

- 1 Ils se réfléchissent (c'est toujours le cas sur un miroir).
- 2 (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 $\alpha = 180 - 45 \times 2 = 90^\circ$.
- 3 [a]. Un milieu dispersif est un milieu où l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde. La vitesse de la lumière dans le milieu peut s'écrire $v = c/n$, donc, c étant constante et n dépendant de la longueur d'onde, v dépend également de la longueur d'onde.

2 Marche d'un rayon

Énoncé
p. 79

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 :

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

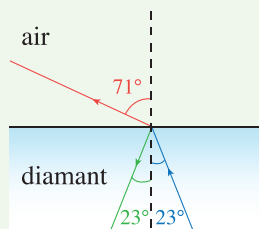


Figure 5.12 – Marche des rayons réfléchi et transmis.

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.

3 Compléter les phrases

Énoncé
p. 80

Lycée Jacques Decour, Paris

- 1 Le changement de direction que subit la lumière lorsqu'elle change de milieu de propagation est appelé *réfraction*.
- 2 Pour une radiation donnée, un milieu transparent est caractérisé par un nombre appelé *indice de réfraction*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 3 L'angle d'incidence est l'angle entre le rayon incident et la *normale* au dioptre.

4 Dioptre air-eau

Énoncé
p. 80

Lycée Pierre de Fermat, Toulouse

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 :

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

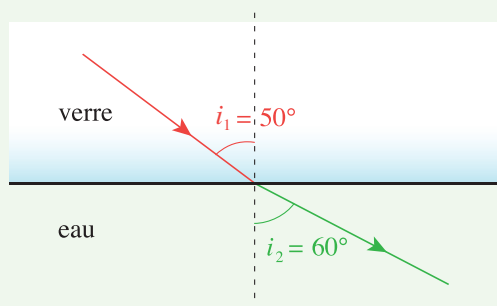


Figure 5.13 – Marche du rayon réfracté au passage du dioptre verre/eau.
L'application numérique donne :

$$i_1 = 50^\circ.$$

5 Cuve à réfraction

Énoncé
p. 80

Lycée Bergson, Paris

- 1 Le dispositif expérimental a l'allure suivante :

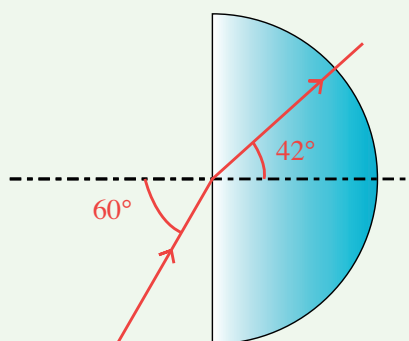


Figure 5.14 – Marche du rayon incident dans la cuve à réfraction.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

- 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 :

$$n = \underbrace{n_{\text{air}}}_{=1} \frac{\sin 60^\circ}{\sin 42^\circ} = 1,3.$$

6 Projecteur dans un bassin

Énoncé
p. 81

Lycée Pasteur, Neuilly

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 :

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

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-dessous.

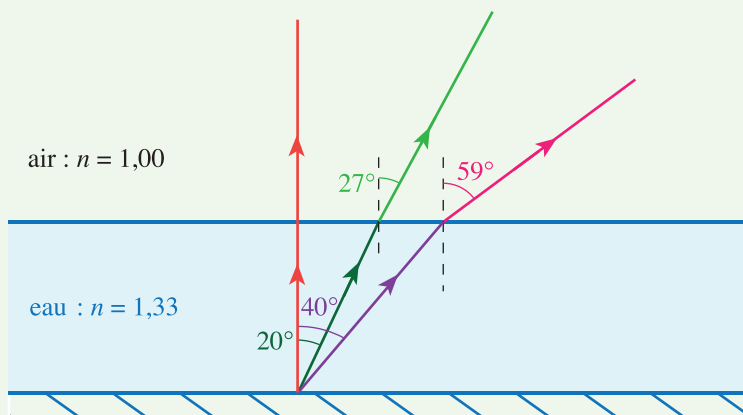


Figure 5.15 – Marche des rayons d'incidence 20 et 40 degrés.

7 Marche d'un rayon

Énoncé
p. 81

Lycée Hector Berlioz, Vincennes

On nomme les différents angles conformément à la figure représentée page suivante.

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

Écrivons la loi de Snell-Descartes au dioptre 1 :

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

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Écrivons-la à présent au dioptre 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.

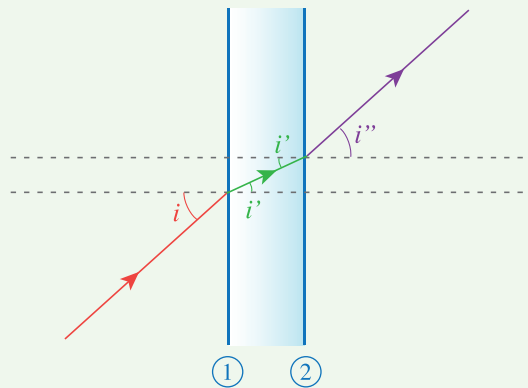
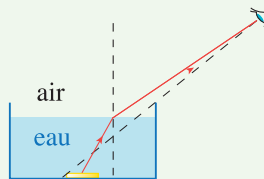


Figure 5.16 – Notation des angles.

8 Réfraction

Lycée Saint-Martin, Pontoise

Énoncé
p. 81



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.

9 Aquarium

Lycée du Parc des Loges, Évry

Énoncé
p. 82

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

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

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

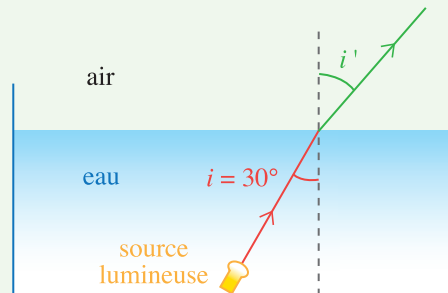


Figure 5.17 – Marche du rayon issu du projecteur.

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

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 :

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

10 Profondeur apparente d'une piscine

Énoncé
p. 82

Lycée Emmanuel Mounier, Châtenay-Malabry

- 1** 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 : $\alpha = 41,7^\circ$.

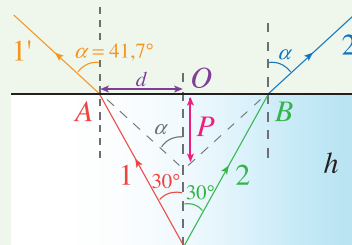


Figure 5.18 – Marche des rayons 1 et 2, qui semblent, pour un observateur situé au-dessus de la surface, provenir du point P.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 2 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 : $AB = 3,46 \text{ m}$.

- 3 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.

11 Spectre de la lumière blanche

Lycée Saint-Exupéry, Lyon

Énoncé
p. 82

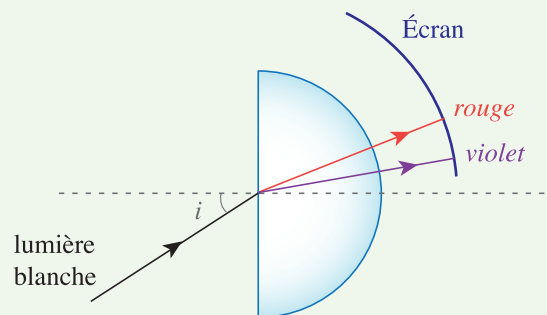


Figure 5.19 – Dispersion des couleurs dans le demi-cylindre.

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

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

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.

12 Étude d'un prisme simplifié

Énoncé
p. 83

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

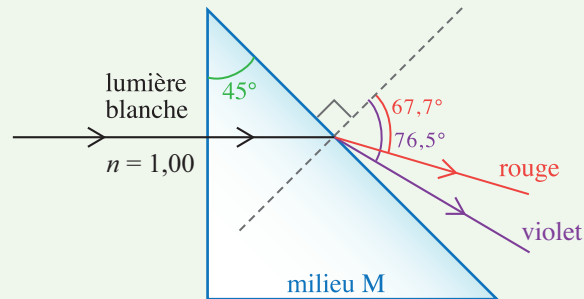


Figure 5.20 – Marche des rayons rouge et violet.

- 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.

13 Réfraction atmosphérique

Énoncé
p. 84

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 dioptre vide-atmosphère :

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

- (c) L'application numérique donne :

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

d'où l'on déduit :

$$\alpha' = 69,953^\circ.$$

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

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

Le rayon incident est dévié, en direction du zénith, d'un angle de $0,047^\circ$.

- (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.

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

- 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 :

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= n_3 \times \sin \alpha_3 \\ n_3 \times \sin \alpha_3 &= n_2 \times \sin \alpha_2 \\ n_2 \times \sin \alpha_2 &= n_1 \times \sin \alpha'\end{aligned}$$

Des deux premières égalités on déduit :

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

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

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

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.

14 Angle de Brewster

Lycée Montaigne, Bordeaux

Énoncé
p. 85

La situation est représentée sur la figure page ci-contre

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 :

$$i + i' = 90^\circ.$$

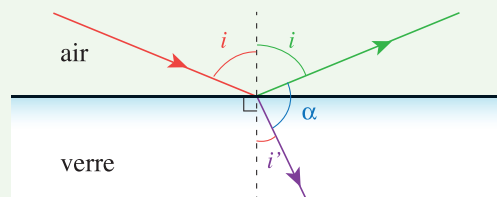


Figure 5.21 – Le rayon transmis est perpendiculaire au rayon réfléchi.

En outre, on a la relation de Snell-Descartes relative à la réfraction :

$$n_{\text{air}} \times \sin i = n_{\text{verre}} \times \sin i'$$

qui s'écrit ici, compte tenu de la relation entre i et i' :

$$n_{\text{air}} \times \sin i = n_{\text{verre}} \times \sin(90^\circ - i).$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 :

$$i = 56^\circ.$$

L'angle de Brewster pour une réflexion sur du verre est donc de 56° .

15 Dispersion par un demi-cylindre

Énoncé
p. 85

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.

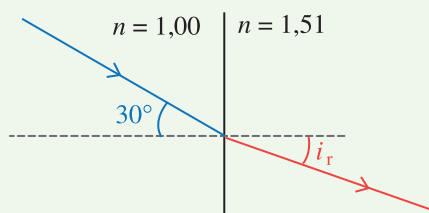


Figure 5.22 – Marche d'un rayon de lumière rouge.

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

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

RÉFLEXION ET RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE • CHAP. 5

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.

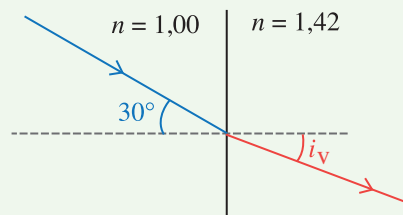


Figure 5.23 – Marche d'un rayon de lumière violette.

Application numérique :

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

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

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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.

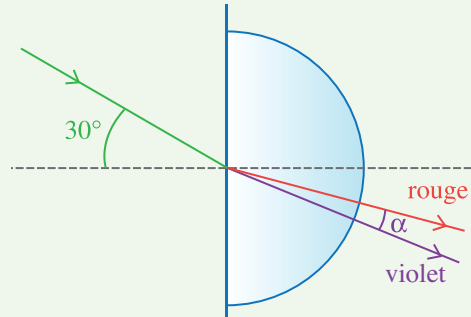


Figure 5.24 – Étalement des couleurs donné par le prisme.

- (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 $1,3^\circ$.

Chapitre 6

Spectres lumineux

Plan du chapitre

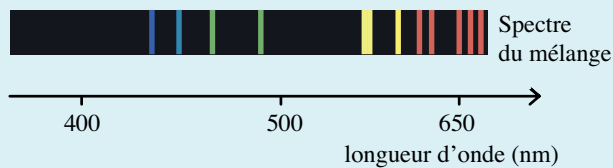
1. Introduction
2. Ondes lumineuses et longueur d'onde
3. Décomposition d'une lumière
4. Spectres thermiques
5. Spectres de raies d'émission

1 Introduction

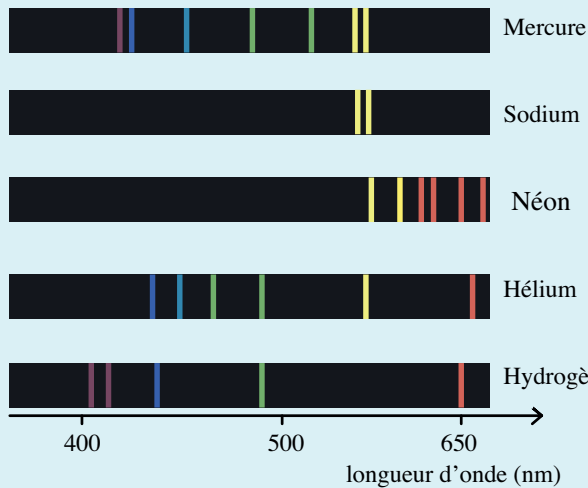
Exercice type

Nouveau Programme

On considère le spectre d'une vapeur à basse pression d'un mélange de gaz :



On donne par ailleurs les spectres de divers éléments :



- 1 Comment appelle-t-on ce type de spectre ?
- 2 Quels éléments peut-on identifier dans le mélange ?

Voir corrigé page 104

Ce chapitre introduit la notion de spectre d'émission.

2 Ondes lumineuses et longueur d'onde

La lumière visible est une onde, appelée onde électromagnétique. La nature des perturbations vibratoires qui lui sont associées est totalement hors-programme, et ne sera pas abordée avant le baccalauréat.

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 390 nm (violet) et 780 nm (rouge).

Définition 1

On appelle radiation monochromatique une radiation composée d'une seule couleur. Une telle radiation 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.

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).

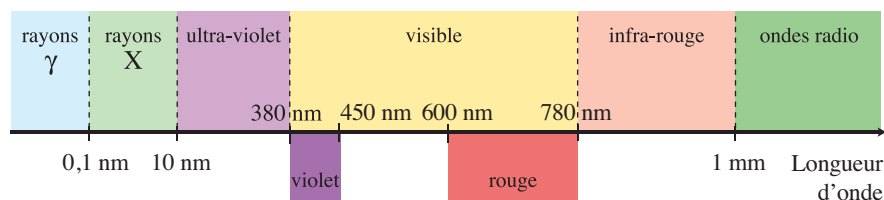


Figure 6.1 – Appellation des ondes électromagnétiques pour différents domaines de longueur d'onde.

Les appellations très diverses des différents domaines de longueur d'onde des ondes électromagnétiques sont justifiées seulement par des raisons historiques ou par la nature des détecteurs à mettre en œuvre. A part la longueur d'onde, il n'y a pas de différence fondamentale entre les divers domaines.

La longueur d'onde d'une radiation lumineuse dépend du milieu dans lequel elle se propage. Cette longueur d'onde est pratiquement la même dans le vide et dans l'air. En revanche, dans un milieu comme l'eau, par exemple, elle est nettement plus courte. Pour repérer une onde électromagnétique, on conviendra donc de la désigner implicitement par sa longueur d'onde dans le vide.

3 Décomposition d'une lumière

Les rayonnements polychromatiques sont constituées de plusieurs longueurs d'ondes. Lorsqu'il s'agit de rayonnement visibles, on parle de lumières polychromatiques. Ces lumières sont donc constituées de plusieurs couleurs. Par exemple, la lumière blanche est en fait la superposition de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Il est possible de faire apparaître l'ensemble des couleurs constituant une lumière en utilisant ce qu'on appelle un système dispersif. Les systèmes dispersifs les plus couramment utilisés sont le prisme et le réseau.

Un prisme est un bloc en matière transparente, à base triangulaire qui permet de séparer les différentes couleurs d'un rayon lumineux car elles ne sont pas toutes déviées du même angle (ce phénomène sera étudié plus en détail dans le chapitre précédent consacré à la réfraction des rayons lumineux).

Un réseau est constitué de fentes parallèles régulièrement espacées très proches les unes des autres (typiquement plusieurs centaines de fentes par millimètre).

L'ensemble des couleurs qui apparaîtront après que la lumière a traversé un système dispersif correspondra au spectre de cette lumière.

Définition 3

On appelle *spectre* d'une lumière l'ensemble des couleurs dont elle est constituée.

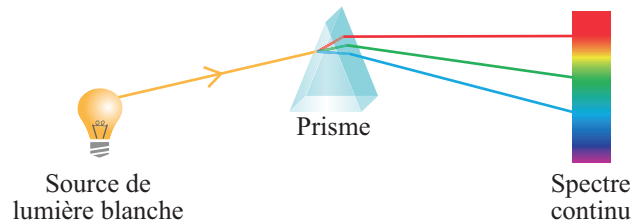
Lorsqu'un rayon lumineux unique laisse apparaître plusieurs composantes colorées, on dit qu'on a décomposé la lumière.

Lorsque la décomposition de la lumière laisse apparaître différentes couleurs qui se touchent (comme un arc-en-ciel), on parle de spectre continu. C'est le type de spectres qu'on obtient généralement en chauffant un solide (filament d'une ampoule à incandescence par exemple). On parle alors de spectre thermique.

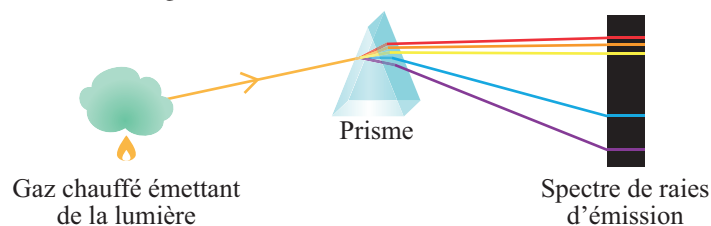
COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Lorsque la décomposition laisse apparaître des bandes colorées sur un fond noir, on parle de spectre de raies. C'est généralement le type de spectres que l'on obtient en chauffant des gaz.



Le spectre d'une lumière peut apporter des informations sur les propriétés physiques de l'objet dont elle est issue ou des gaz qu'elle a rencontrés sur son parcours.

4 Spectres thermiques

À RETENIR

Un corps chaud 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.

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).

SPECTRES LUMINEUX • CHAP. 6

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 $3\,500^{\circ}\text{C}$ dans une ampoule à incandescence.

Nous avons représenté sur la figure ci-dessous les spectres de trois corps chauds à trois températures différentes.

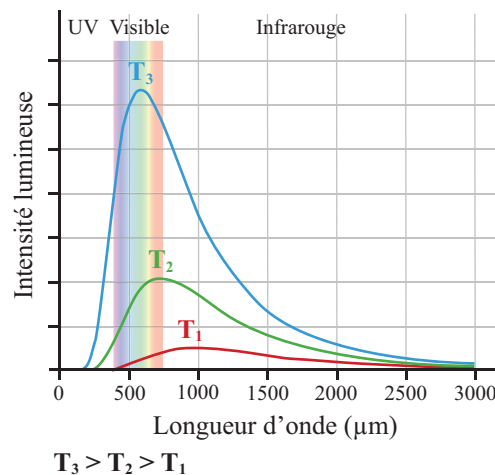


Figure 6.2 – Spectres de corps chauds.

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

5 Spectres de raies d'émission

Les considérations de spectre thermique de la section précédente sont valables pour des corps *opaques* à toutes les longueurs d'onde. Un gaz dilué, à basse pression, est en général transparent. Si on le chauffe il n'émet 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 6.3 – 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. D'autres lampadaires utilisent des lampes à vapeur de mercure, qui elles aussi ont un spectre de raies d'émission.

➔ À RETENIR

Un spectre de raies nous renseigne sur la composition chimique du système qui l'émet : les longueurs d'onde des raies sont caractéristiques des espèces qui les émettent.

Ceci est particulièrement important en Astrophysique, où la seule manière d'analyser un corps est d'étudier la lumière qu'on en reçoit.

Remarque : notons que la spectroscopie ne nous renseigne pas seulement sur la composition qualitative des astres. L'étude de la forme précise des raies 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

Nouveau Programme

- 1 On appelle ces spectres des spectres de raies d'émission.
- 2 On retrouve dans le spectre du mélange les raies de l'hélium et celles du néon. On peut donc identifier ces deux éléments dans le mélange.

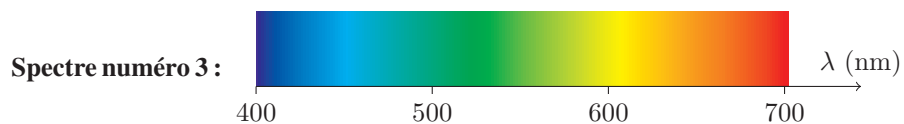
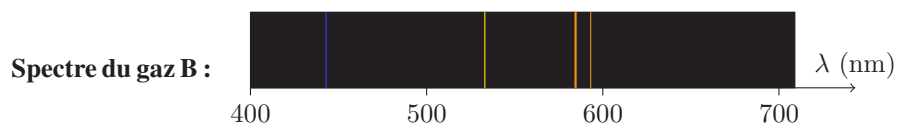
Voir énoncé page 99

SPECTRES LUMINEUX • CHAP. 6

1 QCM Testez vos connaissances

15 min Corrigé
p. 109

On considère les trois spectres ci-dessous :



1 Le spectre du gaz A est un spectre d'émission.

☐ a Vrai

☐ b Faux

2 Le spectre numéro 3 est un spectre d'émission.

☐ a Vrai

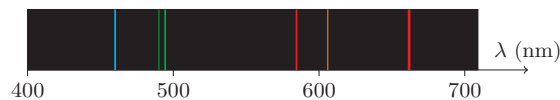
☐ b Faux

3 Le spectre du gaz B est un spectre thermique.

☐ a Vrai

☐ b Faux

On considère à présent le spectre suivant :



Le milieu chaud à basse pression utilisé pour ce spectre contient

☐ a le gaz A

☐ b le gaz B

4 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 ?



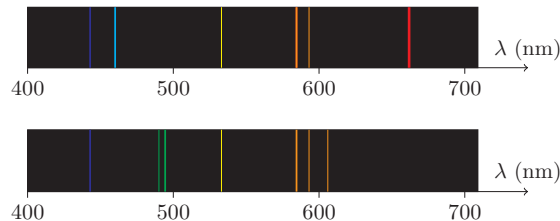
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 5 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. 109

- 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 Compléter les phrases



5 min

Corrigé
p. 109

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.

4 Domaines de longueurs d'onde



2 min

Corrigé
p. 109

Lycée Jean Guehenno, Flers

Classer par ordre de longueur d'onde croissante les radiations suivantes :

Lumière bleue, radiation infrarouge, radiation ultraviolette, lumière jaune.

SPECTRES LUMINEUX • CHAP. 6

5 Couleurs d'étoiles



10 min

Corrigé
p. 110

Lycée Victor Hugo, Besançon

On considère les spectres des cinq étoiles suivantes : le Soleil, Deneb, Alnilam, 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 ?

6 Analyse du profil spectral de χ Ori



15 min

Corrigé
p. 110

Lycée François Couperin, Fontainebleau

Le profil spectral de l'étoile χ Ori, dans la constellation d'Orion, est donné sur la figure page suivante : la courbe représente l'intensité lumineuse relative en fonction de la longueur d'onde des radiations émises par cette étoile. Notons que la longueur d'onde est exprimée ici en angström (1 angström = 10^{-10} m = 0,1 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.

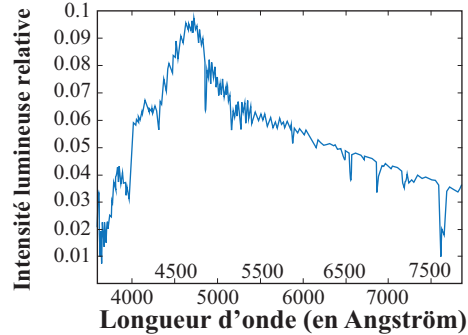
Remarque : cette relation est exacte lorsque la température est exprimée en kelvins (unité qui sera étudiée dans les classes ultérieures). Elle porte alors le nom de loi de Wien.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

HD39587 - 26.944/12/2006 - SCT 0.3m + LHIRES#073 150 gr/mm - 2.993 A/pixel - 7x120 s



- 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 de cette étoile.

7 Calibration de spectre



15 min

Corrigé
p. 111

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.

SPECTRES LUMINEUX • CHAP. 6

1 **QCM** Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 105

- 1 **a**. C'est un spectre (de raies) d'émission.
- 2 **a**. C'est un spectre thermique (donc d'émission).
- 3 **b**. Un spectre thermique est continu.
- 4 **b**. Les raies qui n'appartiennent pas au gaz A sont le doublet vers 500 nm et la raie vers 600 nm, qui correspondent au deuxième spectre proposé.
- 5 **b** : les raies en commun sont celles du gaz B.

2 **QCM** Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 106

- 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 Compléter les phrases

→ Énoncé
p. 106

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.

4 Domaines de longueurs d'onde

→ Énoncé
p. 106

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

5 Couleurs d'étoiles

Énoncé
p. 107

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.

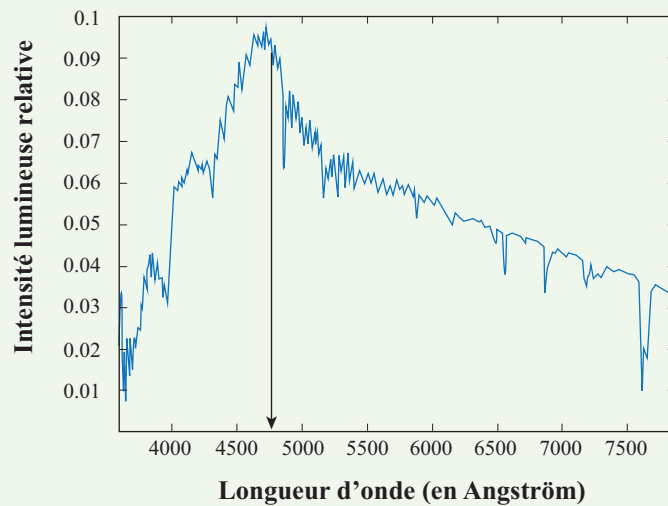
6 Analyse du profil spectral de χ Ori

Énoncé
p. 107

Lycée François Couperin, Fontainebleau

- 1 Par lecture graphique, on détermine $\lambda_{\max}$:

HD39587 - 26.944/12/2006 - SCT 0.3m + LHIRES#073 150 gr/mm - 2.993 Å/pixel - 7x120 s



$$\lambda_{\max} = 4\,750 \text{ Angström} = 475 \text{ nm}$$

SPECTRES LUMINEUX • CHAP. 6

- 2 L'application de la relation de l'énoncé permet de déterminer la température de surface de cette étoile :

$$T \approx \frac{2,8 \times 10^6}{\lambda_{\max}} = \frac{2,8 \times 10^6}{475} \approx 5,9 \cdot 10^3 \text{ °C.}$$

Il s'agit d'une étoile légèrement plus chaude, en surface, que le soleil.

7 Calibration de spectre

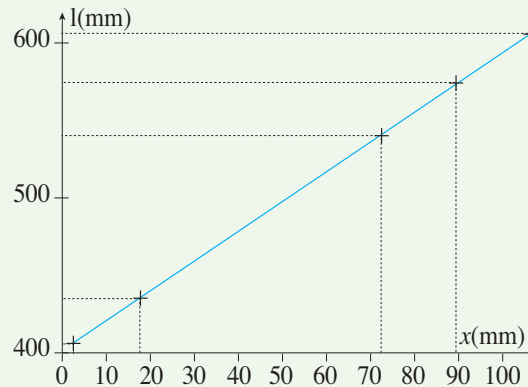
Énoncé
p. 108

Lycée du Parc, Lyon

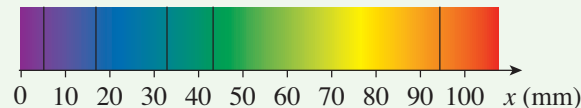
- 1 Une lampe à vapeur de mercure contient un gaz dilué, excité par le passage d'un courant électrique, qui émet à des longueurs d'onde bien précises : c'est un spectre d'émission.
- 2 Les radiations bleues du spectre visible sont du côté des petites longueurs d'onde, et également du côté des petites 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 :



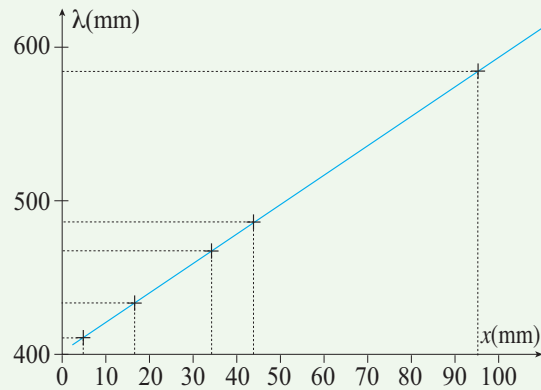
- (b) Pour déduire les longueurs d'onde des raies d'absorption, on utilise

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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). Précisons que le fer n'est pas présent dans l'étoile, vu qu'une seule des deux raies est présente. 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.

Les lentilles minces convergentes

Plan du chapitre

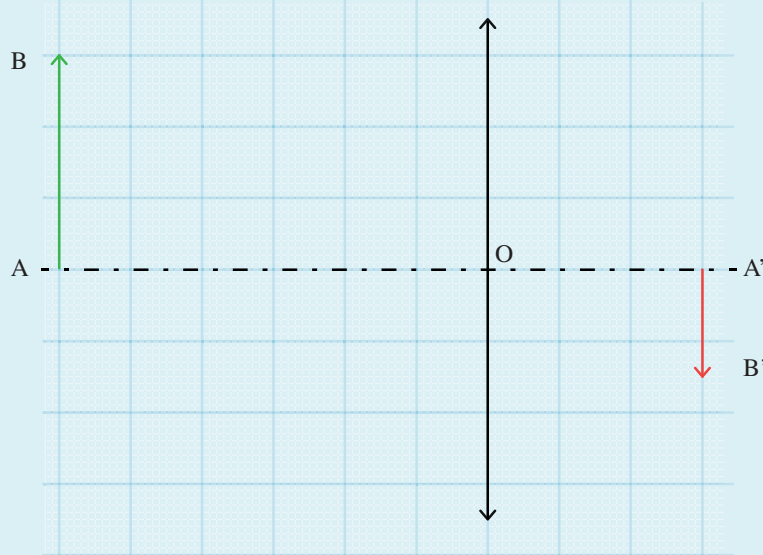
1. Introduction
2. Définition et convention
3. Propriétés des lentilles minces convergentes
4. Construire l'image d'un objet
5. Grandissement
6. Modèle de l'œil

1 Introduction

Exercice type

Lycée Janson de Sailly, Paris

On considère le montage optique suivant, représenté à l'échelle 1 : 1. La lentille mince convergente, de centre optique O , donne de l'objet AB l'image $A'B'$.



Exercice type (suite)

Lycée Janson de Sailly, Paris

- 1 Déterminer graphiquement la position des points foyer objet et image.
- 2 Quelle est la distance focale de la lentille ?
- 3 Quel est le grandissement donné par ce montage ?

Voir corrigé page 122

Dans ce chapitre nous étudions un système optique très répandu, la lentille convergente. Nous y voyons la notion de rayon lumineux, de foyer, et apprenons à construire la marche d'un rayon quelconque traversant une lentille mince.

2 Définition et convention

2.1 Qu'est-ce qu'une lentille ?

Définition 1

Une lentille est un système constitué d'un matériau transparent, limité par deux surfaces sphériques.

Une lentille est convergente si elle est plus mince sur ses bords qu'en son centre.

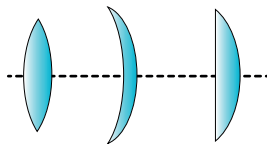


Figure 7.1 – Lentilles convergentes

Sur l'exemple ci-dessus, on représente, vues en coupe, un certain nombre de lentilles minces. Elles sont plus épaisses en leur centre qu'au bord : ce sont des lentilles *convergentes*. En revanche, la lentille ci-dessous n'est pas convergente.

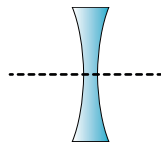
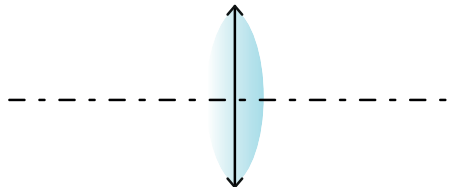


Figure 7.2 – Lentille non convergente

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

2.2 Représentation d'une lentille mince convergente

On représente schématiquement une lentille mince convergente par une double flèche comme sur la figure page ci-après :



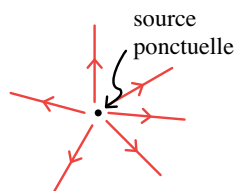
L'axe pointillé est appelé l'axe optique. C'est l'axe de symétrie de la lentille mince.

3 Propriétés des lentilles minces convergentes

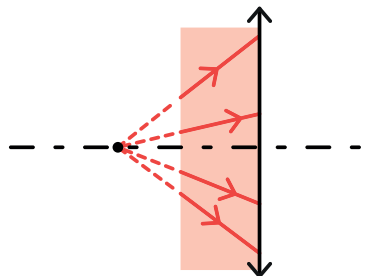
Il est très utile lorsqu'on étudie les lentilles minces de considérer l'image de quelques points d'un objet. Chacun de ces points peut être vu comme une *source ponctuelle*.

3.1 Notion de source ponctuelle

Une source ponctuelle est une source de lumière de très petite dimension. Ainsi, un trou d'épingle dans une feuille cartonnée, un pixel d'un écran de téléphone ou moniteur, etc. peuvent être considérés comme des sources ponctuelles. On représente ci-après quelques rayons lumineux (représentés en rouge) émis par une source ponctuelle.



Nous allons à présent nous intéresser à la trajectoire des rayons lumineux issus d'une source ponctuelle lorsqu'ils traversent une lentille mince. On considère une source ponctuelle sur l'axe optique d'une lentille mince :

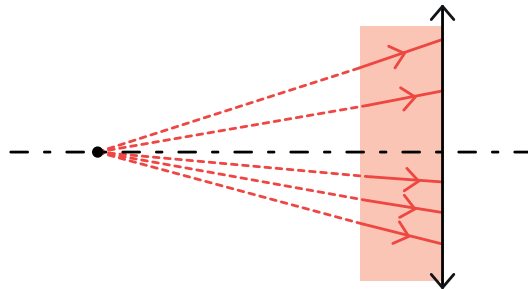


COURS

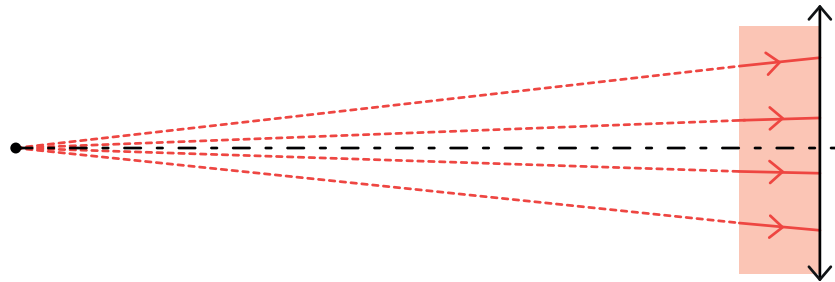
INTERROS

CORRIGÉS

Au voisinage de la lentille, on voit que les rayons ne sont pas parallèles, mais divergents : ils s'éloignent les uns des autres. À présent nous éloignons la source de la lentille, comme ci-après :



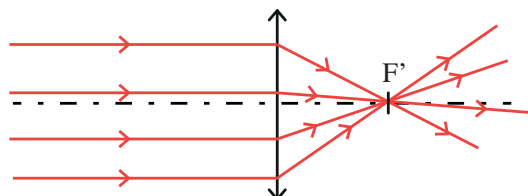
Nous voyons que les rayons, au voisinage de la lentille, sont moins inclinés que dans le cas précédent. Ceci est d'autant plus vrai que la source est loin sur l'axe, à gauche :



Dans le cas limite où la source est très loin à gauche sur l'axe, les rayons sont quasi-parallèles à l'axe optique. On parle de « faisceau parallèle » pour une source située « à l'infini ».

3.2 Point foyer image

Considérons un faisceau parallèle comme on l'a vu précédemment, avec une source « à l'infini » sur l'axe optique. Tous les rayons de cette source, lorsqu'ils émergent de la lentille, passent par un point unique F' , situé sur l'axe optique. Ce point est appelé le point foyer image. Il est caractéristique de la lentille.



LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

À RETENIR

Tout rayon incident parallèle à l'axe optique passe par le point foyer image F' lorsqu'il émerge de la lentille.

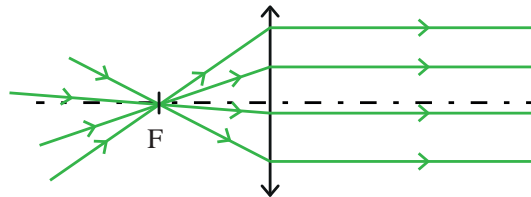
3.3 Point foyer objet

Réciproquement, il existe un point F situé en amont de la lentille, appelé point foyer objet, qui a la propriété suivante :

À RETENIR

Tout rayon passant par le point foyer objet émerge parallèlement à l'axe optique.

Nous illustrons cette propriété sur la figure ci-dessous.



Remarque : les points foyer image F' et objet F sont toujours situés à la même distance de la lentille.

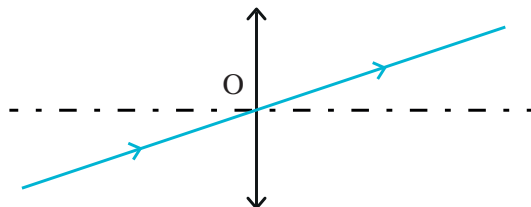
3.4 Centre optique

Le point d'intersection de la lentille avec l'axe optique, généralement noté O , est appelé le centre optique.

À RETENIR

Tout rayon passant par le centre optique n'est pas dévié à la traversée de la lentille.

Nous voyons sur la figure ci-dessous que le rayon, qui passe par O , n'est pas dévié et continue en ligne droite.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

À RETENIR

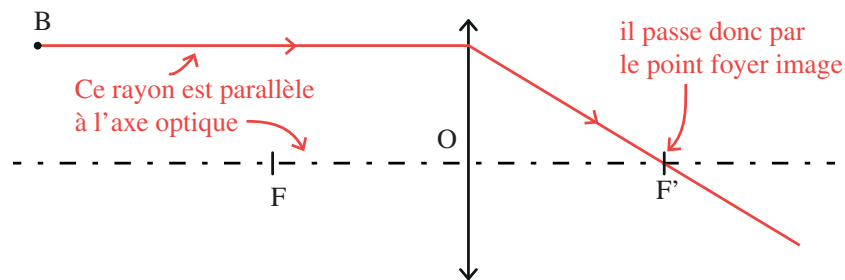
On appelle distance focale f d'une lentille mince convergente la distance OF ou OF' :

$$f = OF = OF'.$$

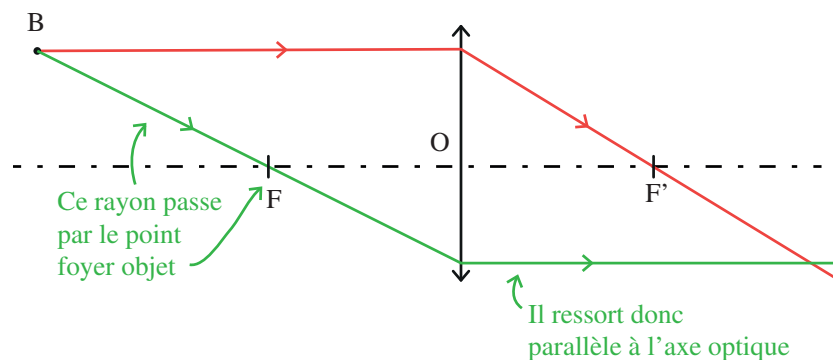
4 Construire l'image d'un objet

Nous considérons une source ponctuelle B située quelque part en amont du point foyer objet. Comment se comportent les rayons issus de cette source lorsqu'ils traversent la lentille ? Nous savons déjà construire trois rayons issus de cette source, en utilisant les propriétés vues ci-dessus.

Commençons par le rayon parallèle à l'axe optique. Nous savons qu'il passe par le point foyer image F' , donc il a nécessairement l'allure suivante :

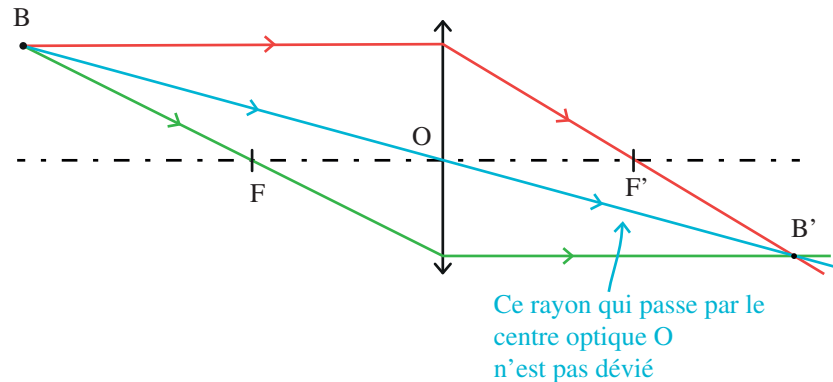


Continuons avec le rayon issu de cette source qui passe par le point foyer objet F . Nous savons qu'il doit émerger de la lentille parallèlement à l'axe optique, donc il a nécessairement l'allure suivante :



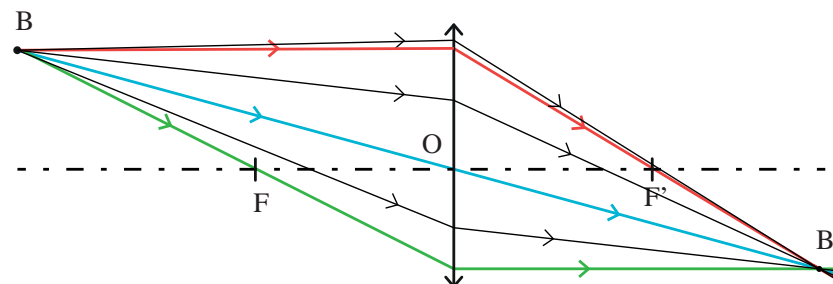
Enfin, utilisons le fait qu'un rayon qui passe par le centre optique O n'est pas dévié. Traçons le rayon issu de la source qui passe par O (voir page ci-contre).

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7



Nous voyons que ces trois rayons s'intersectent en un même point B' à droite de la lentille.

Qu'en est-il des autres rayons ? Il se trouve *qu'ils convergent tous en ce même point B'* . Ceci nous permet de tracer la marche d'autres rayons sans propriété particulière (c.-à-d. qui ne passent ni par F , ni par F' , ni par O). Nous en représentons quelques uns sur la figure ci-après.



Nous pouvons en conclure que des rayons qui proviennent d'un même point en amont du foyer objet convergent en un même point après leur traversée de la lentille.

Remarque : Naturellement, il n'est pas nécessaire d'utiliser les trois rayons ci-dessus pour déterminer le point d'intersection à droite de la lentille. Deux rayons suffisent.

Si on place un écran à la position du point B' , on y verra donc un point lumineux, image de la source en B . Le point B' est, en quelque sorte, l'image à un « pixel » d'un objet d'un seul « pixel » (la source ponctuelle en B). Qu'en est-il pour un objet plus compliqué ?

➡ À RETENIR

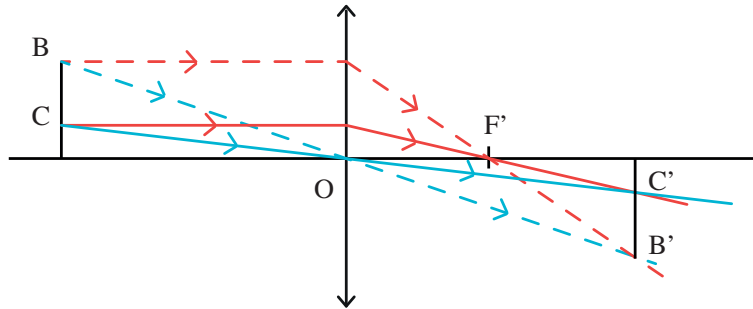
L'image d'un objet plan perpendiculaire à l'axe optique se trouve également dans un plan perpendiculaire à l'axe optique.

COURS

INTERROS

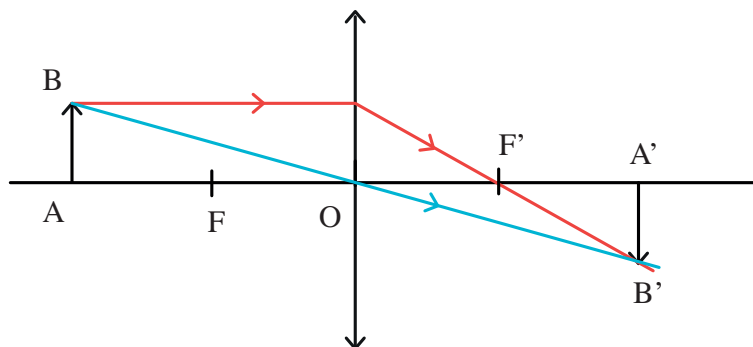
CORRIGÉS

Nous énonçons cette propriété sans démonstration. Nous l'illustrons sur la figure ci-dessous :



Nous voyons un objet formé du segment $[BC]$, perpendiculaire à l'axe optique. L'image de B est B' (on l'a construite ici en utilisant le rayon passant par le centre optique, en pointillés bleus, et celui passant par le foyer image, en pointillés rouges), tandis que l'image de C est C' . On voit que le segment $[B'C']$ est perpendiculaire à l'axe optique.

Remarque : quelle est l'image d'un point sur l'axe ? Pour le point A situé sur l'axe sur la figure ci-dessous, on ne peut pas déterminer directement l'image : les trois rayons particuliers (celui qui passe par le centre optique et les deux qui passent par les foyers) sont confondus avec l'axe optique, et leur intersection n'est donc pas un point unique. Tout au plus peut-on dire que le point image A' se trouve sur l'axe optique. On va donc utiliser la propriété précédente : on prend un point B quelconque dans le plan passant par A et perpendiculaire à l'axe optique, on en construit l'image B' , et on utilise le fait que l'image A' de A se trouve à l'intersection de l'axe optique avec le plan perpendiculaire passant par B' .



Notons que le point B est au-dessus de l'axe optique, alors que le point B' est au-dessous.

➡ À RETENIR

L'image par une lentille mince convergente d'un objet placé avant le foyer objet est inversée.

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

5 Grandissement

Selon la position de l'objet et la distance focale de la lentille, l'image peut être plus ou moins grande. Pour quantifier cet effet, nous introduisons la notion de grandissement.

Définition 2

On appelle grandissement, et on note γ (lettre grecque « gamma ») la quantité telle que :

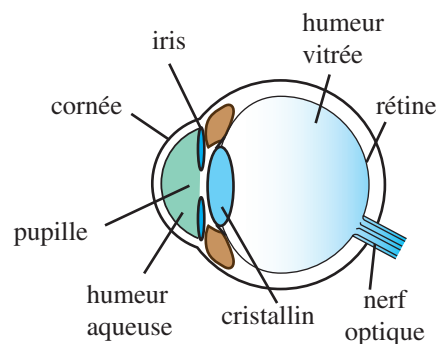
$$|\gamma| = \frac{A'B'}{AB}.$$

La valeur absolue du grandissement apparaît ainsi comme le quotient de la taille de l'image et de la taille de l'objet.

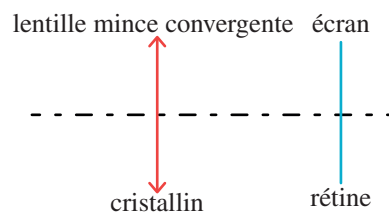
- Si $\gamma < 0$, l'image est renversée (elle est, par rapport à l'objet, « la tête en bas »)
- Si $|\gamma| > 1$, l'image est plus grande que l'objet.
- Si $|\gamma| < 1$, l'image est plus petite que l'objet.

6 Modèle de l'œil

L'œil est un organe extrêmement perfectionné. Il comprend de nombreux éléments. La vue en coupe suivante montre les principaux.



Le cristallin joue le rôle d'une lentille mince convergente. Les rayons qui en émergent arrivent à la rétine où se forme les images des objets situés devant l'œil. La rétine joue en quelque sorte le rôle d'un écran. Un modèle très simplifié de l'œil est donc :



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

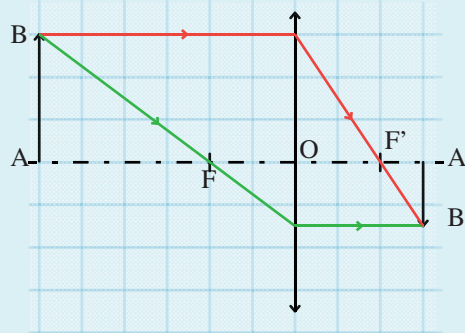
Par convention, γ est positif si l'image est dans le même sens que l'objet (on dit alors que l'image est droite) et négatif si l'image est dans le sens opposé à l'objet (on dit que l'image est renversée).

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Janson de Sailly, Paris

- 1 On sait que tout rayon issu de B va converger en B' au sortir de la lentille, puisque B' est l'image de B. On choisit donc un rayon horizontal issu de B (représenté en rouge). On sait que ce rayon passe par le point foyer image F'. Ce point est donc à l'intersection du rayon représenté en rouge et de l'axe optique.

De manière similaire, on trace le rayon qui arrive en B' parallèlement à l'axe optique. Ce rayon, représenté en vert, provient également de B. On sait qu'il passe par le point foyer objet F, qui est donc l'intersection du rayon représenté en vert et de l'axe optique. On résume cette construction sur la figure ci-après.



- 2 La distance focale est $f = OF = OF'$. On mesure sur la construction de la question précédente que l'on a $f = 2$ cm.
- 3 Le grandissement est donné par : $|\gamma| = \frac{A'B'}{AB}$.
Ici nous avons $A'B' = 15$ mm et $AB = 30$ mm, donc le grandissement est tel que :

$$|\gamma| = \frac{15}{30} = \frac{1}{2}.$$

L'image est renversée donc $\gamma = -\frac{1}{2}$.

🔧 MÉTHODE

Le grandissement, quotient de deux longueurs, est un nombre sans dimension. Il faut bien sûr évaluer les deux longueurs dans les mêmes unités (ici en millimètre) pour obtenir un résultat correct.

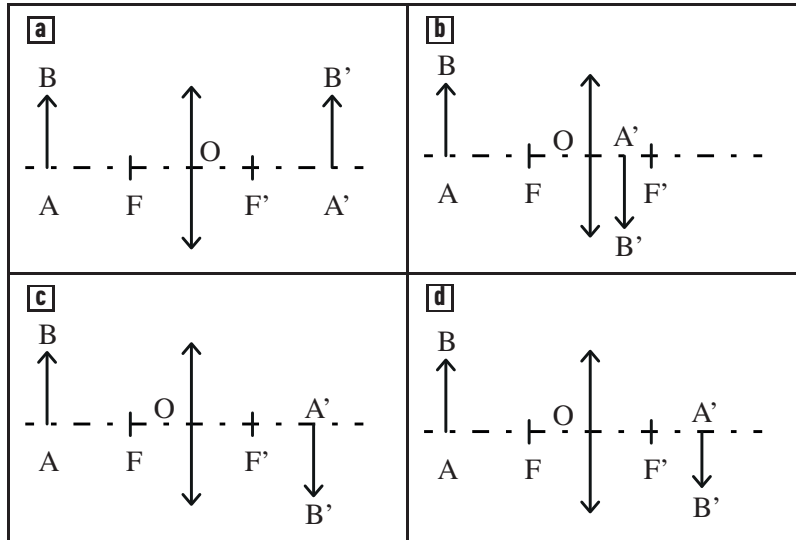
Voir énoncé page 113

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

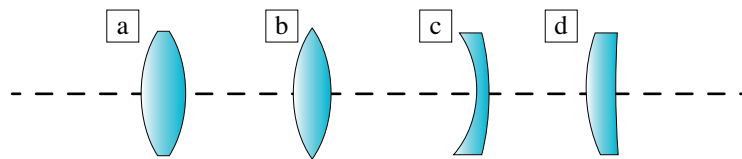
1 QCM Testez vos connaissances

10 min Corrigé
p. 126

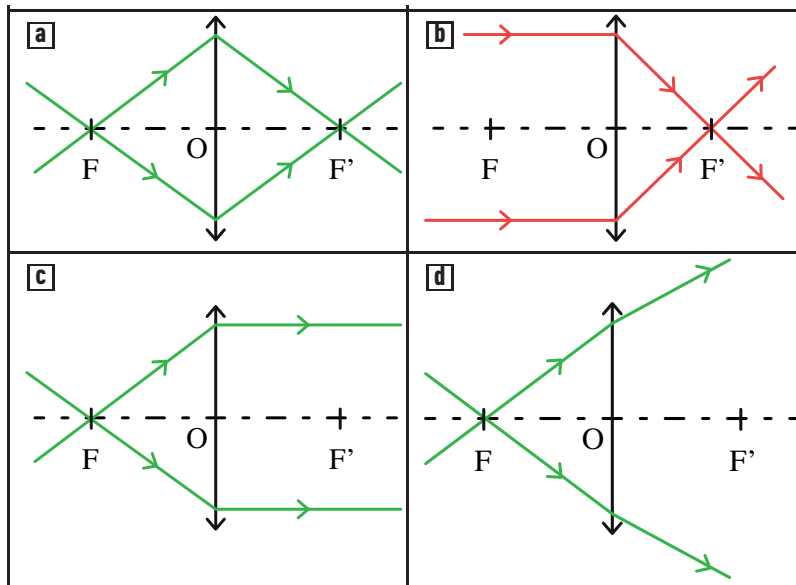
1 Lequel parmi ces schémas est-il correct ? Justifier.



2 Trouver l'intrus :



3 Laquelle de ces constructions est correcte ? Justifier.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

2 Construire une image

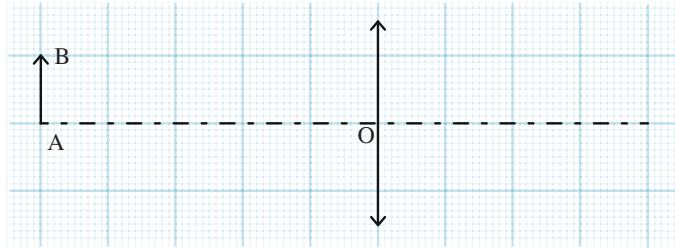


10 min

Corrigé
p. 126

Nouveau programme

On considère le système suivant, représenté à l'échelle 1 : 1. La lentille mince a pour distance focale $f = 2$ cm.



- 1 Au moyen d'une construction graphique, représenter l'image A'B' de l'objet AB.
- 2 Donner une estimation du grandissement.

3 Construire une image

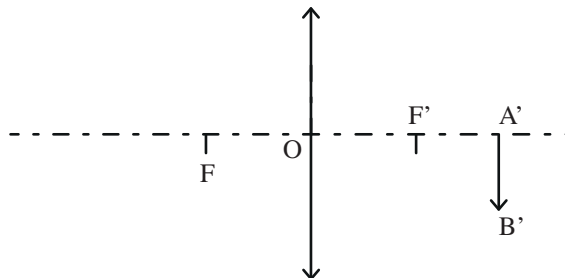


10 min

Corrigé
p. 127

Nouveau programme

Une lentille mince donne d'un objet AB l'image A'B' représentée ci-dessous.



À l'aide d'une construction graphique, trouver la position de l'objet AB.

4 Grandissement



10 min

Corrigé
p. 128

Nouveau programme

Une lentille mince donne d'un objet AB de taille $l = 15$ cm une image renversée A'B' de taille $l' = 30$ cm.

- 1 Quelle est la valeur du grandissement ?
- 2 Sachant que l'objet AB se trouve 50 cm devant la lentille, à quelle distance de celle-ci se trouve l'image A'B' ?

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

5 Un cas particulier



15 min

Corrigé
p. 129

Lycée Louis-le-Grand, Paris

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

On considère une lentille mince de distance focale f , et un objet AB situé à la distance $2f$ de la lentille.

- 1 Montrer, par une construction graphique, que le grandissement vaut -1 .
- 2 Montrer que l'image A'B' se trouve également à la distance $2f$ de la lentille.

6 Mise au point



25 min

Corrigé
p. 130

Nouveau programme

On considère une lentille mince de distance focale $f = 20$ cm et de rayon R . On place sur l'axe optique, à une distance $d_1 = 30$ cm de cette lentille, une source de lumière ponctuelle.

- 1 À quelle distance d_2 de la lentille doit-on placer un écran pour y observer un point lumineux ? On donnera une valeur approchée de cette distance en réalisant sur papier millimétré une construction graphique à l'échelle 1 : 10.
- 2 On décale à présent l'écran d'une distance d en direction de la lentille. Expliquer pourquoi on observe une tache circulaire sur l'écran, et exprimer son rayon r en fonction de d , R et d_2 . Effectuer l'application numérique avec $R = 5$ cm et $d = 10$ cm.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 123

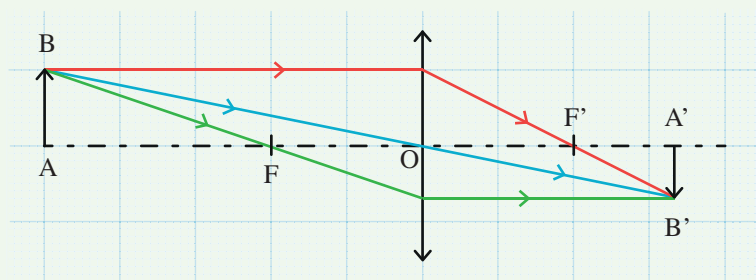
- 1 Réponse **d** : on peut vérifier, en traçant les trois rayons particuliers (ceux qui passent respectivement par F, par F' et par O) que B' est bien l'image de B. Le cas **a** est manifestement faux : on a vu en cours que l'image est inversée. Le cas **b** aussi : le rayon issu de B parallèle à l'axe optique, qui passe par F' au sortir de la lentille, ne peut passer par B'. Pour le cas **c**, on voit que la droite (BO) ne passe pas par B', donc les choix **a** à **c** sont invalides.
- 2 L'intrus est la lentille **c** : c'est la seule qui est plus épaisse sur ses bords qu'au centre. Ce n'est donc pas une lentille convergente.
- 3 Il s'agit de la construction **c** : les rayons passant par le point foyer objet F, ils émergent de la lentille mince parallèlement à l'axe optique. Pour cette raison les choix **a** et **d** sont invalides. La construction **b** est incorrecte car les foyers ne sont pas à la même distance de la lentille.

2 Construire une image

Énoncé
p. 124

Nouveau programme

- 1 Nous commençons par indiquer le point foyer objet F, à 2 cm à gauche de la lentille, et le point foyer image F', à 2 cm à droite de la lentille. Nous traçons ensuite, comme cela a été vu en cours, un rayon issu de B parallèle à l'axe optique (représenté ici en rouge). Il passe par le point foyer image F'. Nous traçons ensuite un rayon issu de B passant par le centre optique O (représenté ici en bleu). Il n'est pas dévié. Les deux rayons s'intersectent en B', comme représenté sur la figure ci-après.



On en déduit la position de A' en utilisant le fait que A' et B' se trouvent dans le même plan perpendiculaire à l'axe optique (autrement dit ici dans un plan vertical).

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

MÉTHODE

Bien que sa construction ne soit pas nécessaire, on peut aussi rajouter un troisième rayon particulier, celui qui passe par le point foyer objet F (représenté ici en vert). Il émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique, et doit intersecter les deux autres rayons en B' (ceci permet de s'assurer que la construction est correcte). Dans la pratique seuls deux rayons parmi les trois représentés sont requis pour construire l'image.

- 2 Nous mesurons les valeurs suivantes :

$$AB \approx 10 \text{ mm}$$

et

$$A'B' \approx 7 \text{ mm}$$

ce qui nous permet de déduire la valeur approchée du grandissement :

$$|\gamma| = \frac{A'B'}{AB} \approx 0,7.$$

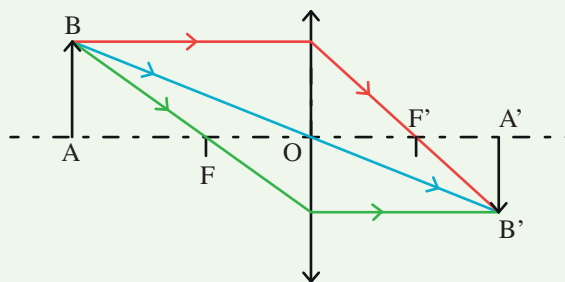
L'image est renversée donc $\gamma = -0,7$.

3 Construire une image

Énoncé
p. 124

Nouveau programme

On trace le rayon passant par F' et arrivant en B' (représenté en rouge sur la figure ci-après). Puisque ce rayon passe par F', il doit avoir été parallèle à l'axe optique avant d'atteindre la lentille. Nous traçons également (en bleu sur la figure) le rayon passant par le centre optique O et le point B', dont on sait qu'il n'a pas été dévié au travers de la lentille.



Le rayon représenté en rouge et celui en bleu s'intersectent en B, objet dont l'image est B'. On en déduit la position de A, qui est à l'intersection de l'axe optique avec le plan perpendiculaire à ce dernier passant par B.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

MÉTHODE

La construction graphique de l'objet, pour une image donnée, est très similaire, dans son principe, à la construction de l'image quand on donne l'objet. Notons que l'on peut là-encore construire un troisième rayon particulier (celui qui passe par le point foyer objet, en vert sur la figure) pour s'assurer qu'il passe bien par le point B.

4 Grandissement

Énoncé
p. 124

Nouveau programme

- 1** Nous avons $AB = l = 15$ cm, et, puisque l'image est inversée :

$$A'B' = l' = 30 \text{ cm.}$$

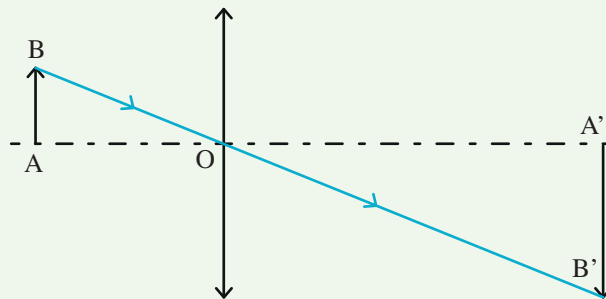
Nous en déduisons la valeur du grandissement :

$$|\gamma| = \frac{A'B'}{AB} \approx 2.$$

L'image est renversée donc $\gamma \approx -2$.

Nous donnons sa valeur avec le même nombre de chiffres significatifs que l et l' dans l'énoncé.

- 2** Nous représentons la situation sur la figure ci-dessous, où nous traçons le rayon passant par le centre optique O.



Les droites (AB) et (A'B') sont parallèles. La droite (A'B') étant située hors du triangle OAB, nous pouvons appliquer la version du théorème de Thalès vue en classe de troisième, qui s'écrit ici :

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{OA'}{OA} = \frac{A'B'}{AB}.$$

Nous avons donc :

$$OA' = OA \times \frac{A'B'}{AB} = OA \times \frac{l'}{l}.$$

L'application numérique donne :

$$OA' = 50 \times 2 = 100 \text{ cm} = 1,0 \text{ m.}$$

L'image se situe donc à un mètre de la lentille.

LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

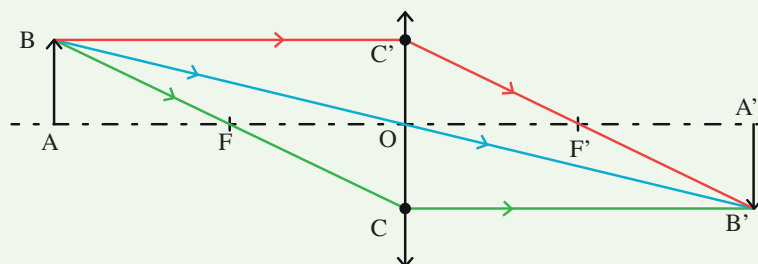
5 Un cas particulier

Énoncé
p. 125

Lycée Louis-le-Grand, Paris



- 1 Nous construisons l'image $A'B'$ de l'objet AB , comme représenté sur la figure ci-après. Le rayon représenté en rouge est parallèle à l'axe optique et passe donc par le point foyer image lorsqu'il émerge de la lentille. Le rayon représenté en bleu passe par le centre optique O et n'est pas dévié. Enfin, le rayon représenté en vert passe par le point foyer objet F et émerge de la lentille parallèlement à l'axe optique.



Nous appelons C le point d'entrée du rayon (BF) dans la lentille, et C' le point d'entrée du rayon issu de B parallèle à l'axe optique. Puisque la droite (CB') est parallèle à l'axe optique, nous avons :

$$OC = A'B'.$$

Par conséquent, pour déterminer la taille de l'image, il suffit de déterminer la distance OC . Les droites (AB) et (OC) sont parallèles, donc nous pouvons appliquer au triangle ABF la version du théorème de Thalès vue en classe de troisième, qui s'écrit ici :

$$\frac{FA}{FO} = \frac{AB}{OC}.$$

Or l'objet est situé à la distance $2f$ de la lentille mince, donc $FA = FO = f$. Par conséquent :

$$\frac{AB}{OC} = 1$$

ou encore :

$$AB = OC.$$

Les distances AB et $A'B'$ sont donc égales. L'image étant inversée, le grandissement vaut -1 .

- 2 Les droites (AB) et $(A'B')$ étant parallèles, nous pouvons appliquer le théorème de Thalès au triangle OAB . Il s'écrit :

$$\frac{OA'}{OA} = \frac{A'B'}{AB} = 1,$$

où nous avons utilisé la réponse à la question précédente. Nous avons donc $OA' = OA = 2f$. L'image se trouve donc elle aussi à la distance $2f$ de la lentille mince.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

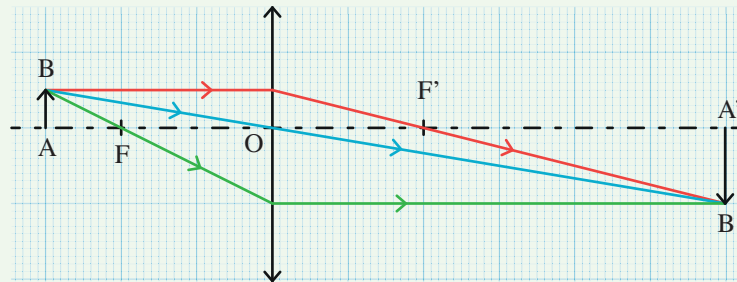
6 Mise au point

Énoncé
p. 125

Nouveau programme

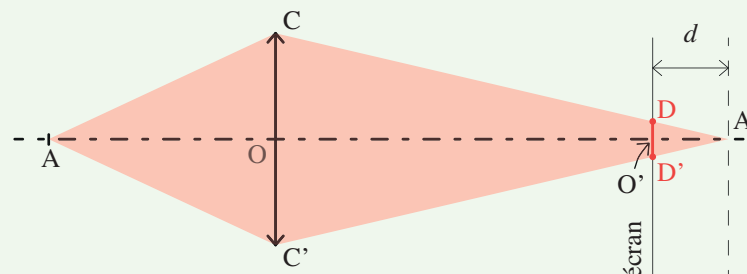
- 1 Appelons A la source ponctuelle. Pour que l'on voit un point lumineux sur l'écran, il faut que celui-ci se trouve à la position de l'image A' de A. Ainsi que nous l'avons vu en cours, il n'est pas possible de déterminer directement, par une construction graphique, l'image d'un point situé sur l'axe optique. Pour résoudre ce problème, nous prenons un point B dans le plan perpendiculaire à l'axe optique passant par le point A, nous construisons l'image B' de B, puis en déduisons l'image A' de A.

Nous représentons cette construction sur la figure ci-après. Au choix, nous devons construire deux rayons parmi les trois représentés, de manière à déterminer leur point d'intersection B'. Le rayon représenté en rouge est parallèle à l'axe optique, et passe donc par le point F' au sortir de la lentille. Le rayon représenté en bleu passe par le centre optique O et n'est donc pas dévié. Enfin le rayon représenté en vert passe par le point foyer objet F et émerge donc de la lentille parallèlement à l'axe optique.



Notons que, puisque nous travaillons à l'échelle 1 : 10, les points F et F' sur la construction doivent être à 20 mm de la lentille, et le point A à 30 mm de cette dernière. Nous mesurons sur la construction graphique une distance d'environ 60 mm entre O et A'. Cela signifie que l'écran doit être placé à $d_2 \approx 60$ cm de la lentille pour que l'on y voit un point lumineux.

- 2 Nous représentons cette situation sur la figure ci-après. L'écran, qui n'est plus au point A', intercepte l'ensemble des rayons issus de A (représenté en rouge) sur le segment [DD'].



LES LENTILLES MINCES CONVERGENTES • CHAP. 7

Il s'agit d'une figure en coupe. En réalité, l'ensemble des rayons issus de A, à droite de la lentille, a une forme *conique*, ce qui donne sur l'écran un tache *circulaire* de rayon O'D. Les droites (OC) et (O'D) étant parallèles, nous pouvons appliquer le théorème de Thalès au triangle COA'. Il s'écrit ici :

$$\frac{O'D}{OC} = \frac{A'O'}{A'O}$$

soit encore, en utilisant les notations de l'énoncé :

$$\frac{r}{R} = \frac{d}{d_2}$$

d'où nous déduisons :

$$r = R \times \frac{d}{d_2}.$$

L'application numérique donne :

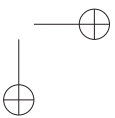
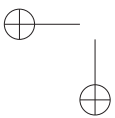
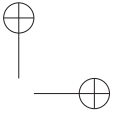
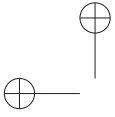
$$r = 5 \times \frac{10}{60} = 0,8 \text{ cm.}$$

Nous gardons un chiffre significatif pour ce résultat, car c'est la précision avec laquelle R est donné dans l'énoncé. Nous observons donc une tache de 0,8 cm de rayon sur l'écran.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

8

Décrire un mouvement

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Vitesse dans un référentiel

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 137

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. Il est constitué d'un objet fixe de référence par rapport auquel on repère les positions du système et d'une horloge permettant un repérage des dates.

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 héliocentrique 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.

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

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 ».

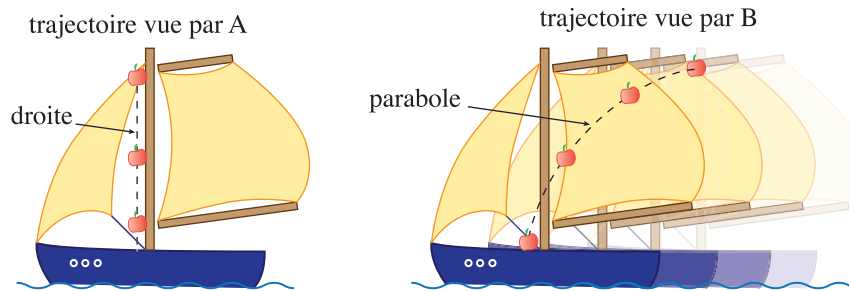


Figure 8.1 – Selon l'observateur, la trajectoire est soit une droite, soit une parabole. Le bateau de gauche est immobile dans le référentiel de l'observateur, tandis que celui de droite se dirige vers la gauche dans le référentiel de l'observateur.

Remarque : au niveau de la classe de Seconde, on simplifie l'étude d'un corps en mouvement en étudiant un point particulier de ce corps. Ainsi, dans le cas de la pomme ci-dessus, ce point particulier serait au centre de la pomme. Ceci conduit inévitablement à une perte d'information : on ne connaît pas le mouvement de tous les points de la pomme, mais seulement de l'un d'entre eux. Ainsi, si la pomme tourne sur elle-même durant sa chute, cela échappe à notre description simplifiée. Réduire le système d'étude à un point a un sens quand la taille de la trajectoire est largement plus grande que celle du système.

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 .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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.

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} .

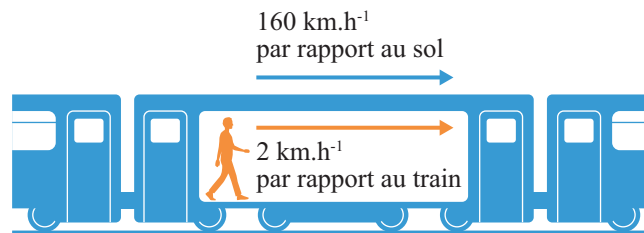
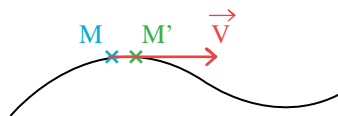


Figure 8.2 – La vitesse d'un corps dépend du référentiel d'étude.

3.3 Vecteur-vitesse

Si un système se trouve au temps t au point M , et au temps t' au point M' , il a subi un déplacement que l'on peut décrire par le vecteur $\overrightarrow{MM'}$.

Si l'on divise ce vecteur par l'intervalle de temps $\Delta t = t' - t$, on obtient un vecteur colinéaire, par construction, au vecteur $\overrightarrow{MM'}$, et dont la norme est, également par construction, égale à la vitesse moyenne du système entre t et t' .



Ce vecteur est appelé vecteur-vitesse. Son expression est donc :

$$\vec{V} = \frac{\overrightarrow{MM'}}{t' - t}.$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

Lorsque l'instant t' est très proche de l'instant t , le point M' se rapproche du point M . Le vecteur $\vec{V}$ est alors appelé le vecteur-vitesse instantanée.

On voit sur la figure précédente, qui représente un cas où M' est proche de M , que le vecteur-vitesse instantanée est orienté « le long de la trajectoire » (en termes mathématiques on dit qu'il est tangent à la trajectoire).

3.4 Mouvement rectiligne uniforme et non uniforme

Le mouvement d'un corps dans un référentiel donné est dit « rectiligne » si sa trajectoire est une droite.

Définition 7

Lorsque la vitesse instantanée ne varie pas au cours du temps, on parle de mouvement uniforme.

Exemples

- 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.
- Le mouvement de la pomme dans le référentiel du bateau est un mouvement rectiligne, mais non uniforme : la pomme est initialement immobile et sa vitesse augmente au cours de la chute.

Remarque : un mouvement peut être uniforme mais non rectiligne.

Par exemple, le bout d'une hélice tournant à vitesse constante a un mouvement circulaire uniforme.

➔ 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.

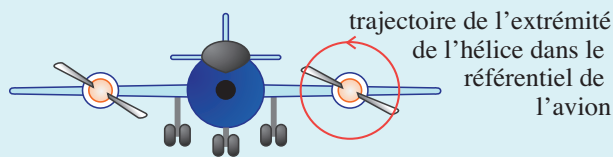


Figure 8.3 – Trajectoire de l'extrémité de la pale dans le référentiel lié à l'avion.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Faidherbe, Lille

- 2 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.

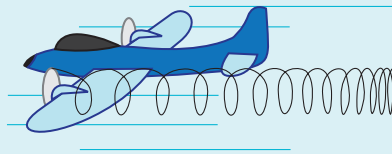


Figure 8.4 – Trajectoire de l'extrémité de la pale dans le référentiel lié à la piste.

- 3 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 8.5 – La trajectoire de l'extrémité de la pale dans son propre référentiel est un point.

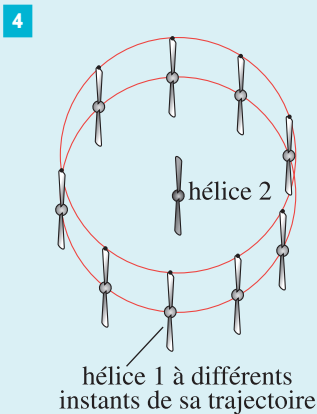


Figure 8.6 – Le cercle d'en bas est la trajectoire du centre de l'hélice, et celui d'en haut la trajectoire de l'extrémité de la pale de l'hélice.

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 133

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 148

- 1 On considère une roue de voiture roulant (sans « dérapage ») 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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2 QCM Référentiels

5 min

Corrigé
p. 148

- 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. 148

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. 149

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 ?

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

5 Composition des mouvements



5 min

Corrigé
p. 149

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 .

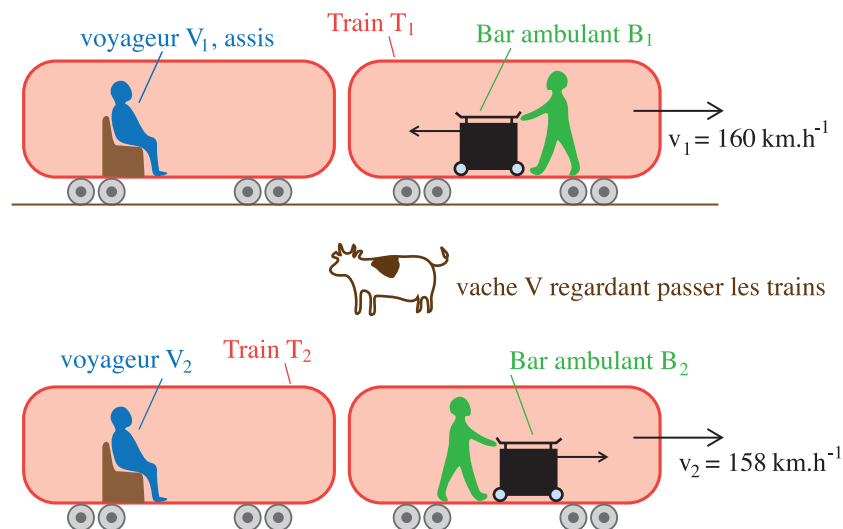


Figure 8.7 – Les différents systèmes représentés sont en mouvement de translation les uns par rapport aux autres.

6 Course à pied



15 min

Corrigé
p. 150

Lycée Paul Sabatier, Carcassonne

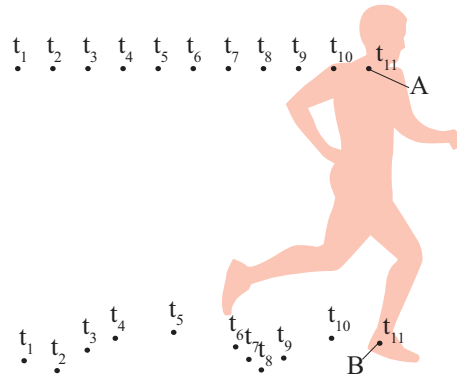
On réalise la chronophotographie d'un coureur à pied, en prenant une image toutes les 50 ms. Des repères lumineux A et B situés respectivement sur le col du coureur et sur sa chaussure droite donnent lieu à l'image ci-dessous, réalisée à l'échelle 1/30^e (un millimètre sur la figure correspond à 30 mm sur le système étudié).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS



- 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. 151

Lycée Hoche, Versailles

Dans 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 $R = 5,0$ m, alors que Florian décrit un cercle de rayon $R = 3,0$ m. Le manège effectue au total 20 tours, qui durent 5 minutes.

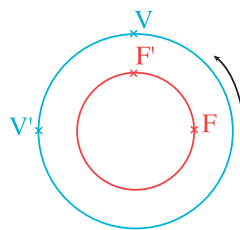


Figure 8.8 – Vue du dessus des trajectoires des deux enfants.

- 1 Calculer les vitesses moyennes respectives de Valentine et Florian.
- 2 Sur la figure 8.8, représenter les vecteurs-vitesse de Valentine aux positions V et V' , et de Florian aux positions F et F' .
On adoptera pour échelle $1 \text{ cm pour } 1 \text{ m.s}^{-1}$.

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

8 Précision d'un chronométrage



15 min

Corrigé
p. 152

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



15 min

Corrigé
p. 152

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-t-il derrière lui ? On supposera la vitesse de ce dernier constante tout au long de son parcours.

10 Mobile sur coussin d'air

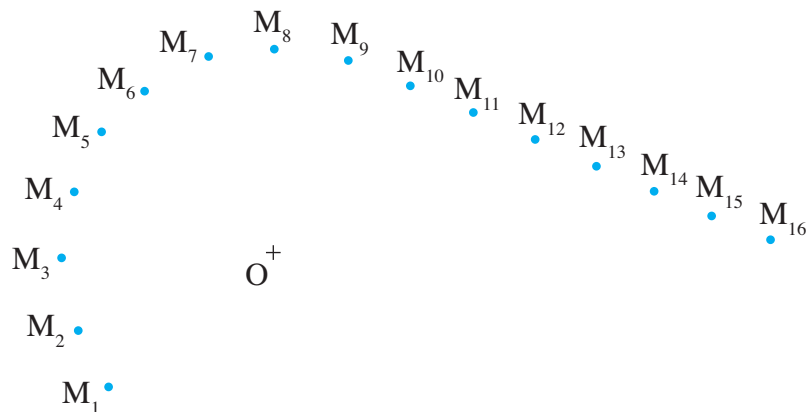


20 min

Corrigé
p. 153

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.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 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 vecteurs 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. 154

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} .

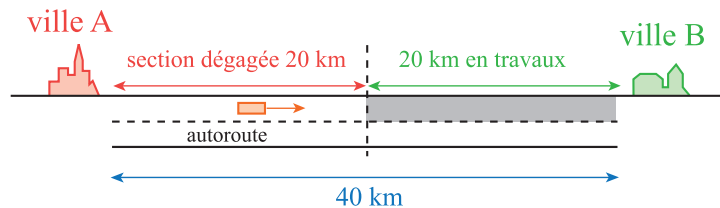


Figure 8.9 – Schéma de l'itinéraire de la voiture.

- 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. 155

Lycée Léonard Limosin, Limoges

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

Un explorateur descend un fleuve à l'aide d'un canot à moteur. La vitesse du courant est $V_c = 6,00 \text{ km.h}^{-1}$, et le moteur communique au bateau une vitesse $V_b = 15,0 \text{ km.h}^{-1}$ 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 ?

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

13 La mouche et le coche



20 min

Corrigé
p. 155

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 $v' = 5 \text{ km.h}^{-1}$. Quelle distance a-t-elle parcourue lorsque les deux coches se croisent ?

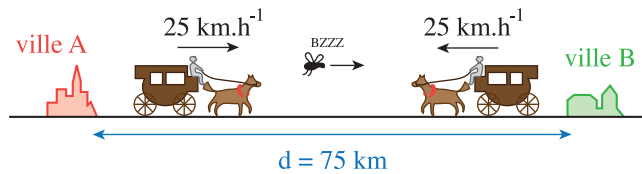


Figure 8.10 – La mouche vole à vitesse constante entre les deux coches.

14 Course automobile



15 min

Corrigé
p. 156

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. 157

Lycée Ampère, Lyon

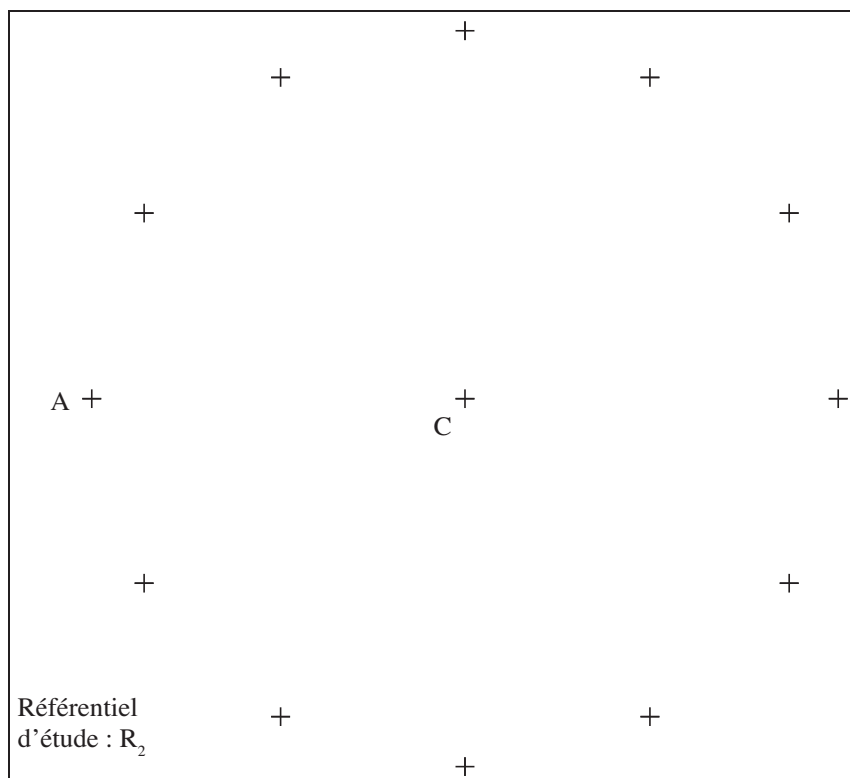
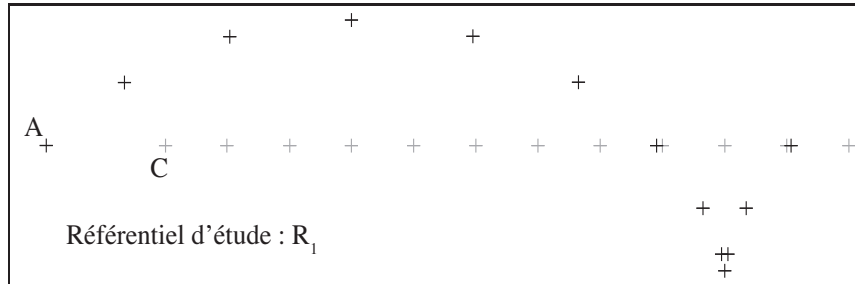
Un cycliste roule en ligne droite sur une route horizontale, à vitesse constante. On étudie les trajectoires de deux points particuliers de l'une de ses roues : le centre C, et un point A situé sur le pneu. Ces trajectoires sont étudiées dans deux référentiels différents, R_1 et R_2 . On donne page suivante les enregistrements correspondants.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS



- 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 ?

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

16 Train Grande Vitesse



20 min

Corrigé
p. 158

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} .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 139

- 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

→ Énoncé
p. 140

- 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

→ Énoncé
p. 140

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.

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

4 Vitesse d'un nageur

Énoncé
p. 140

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

Énoncé
p. 141

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Course à pied

Énoncé
p. 141

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 :

$$v_5 \approx \frac{d}{t_6 - t_4} \approx \frac{1,5 \times 30 \times 0,01}{0,1} = 4,6 \text{ m.s}^{-1}.$$

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 :

$$v_5 \approx 4,6 \times 3,6 \approx 16,2 \text{ km.h}^{-1}.$$

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 :

$$v = \frac{D}{t_8 - t_2} \approx \frac{25 \times 30 \times 10^{-3}}{0,3} = 2,5 \text{ m.s}^{-1}.$$

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 :

$$v \approx 2,5 \times 3,6 \approx 9 \text{ km.h}^{-1}.$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

7 Fête foraine

Énoncé
p. 142

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.

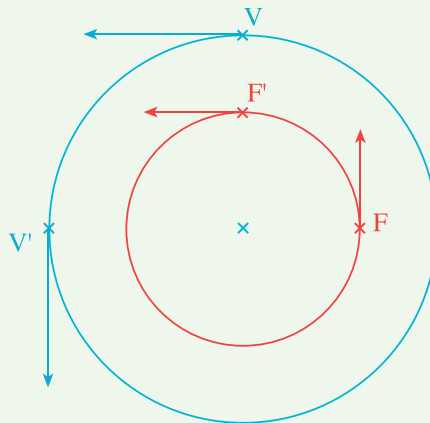


Figure 8.11 – Vecteurs vitesse des deux enfants à différentes positions.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

8 Précision d'un chronométrage

Énoncé
p. 143

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).

9 Arrivée de coureurs

Énoncé
p. 143

Lycée Saint-Louis, Paris

On appelle $t_1 = 44,12$ s le temps réalisé par le premier coureur, et $t_2 = 45,91$ s le temps réalisé par le dernier coureur. La vitesse de ce dernier, supposé constante sur son parcours, est donnée par :

$$v_2 = \frac{L}{t_2},$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

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. 143

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 :

$$v_{15} = \frac{d(M_{14}, M_{16})}{2\tau} \approx \frac{1,6 \times 10^{-2}}{2 \times 10 \times 10^{-3}} \approx 0,80 \text{ m.s}^{-1}.$$

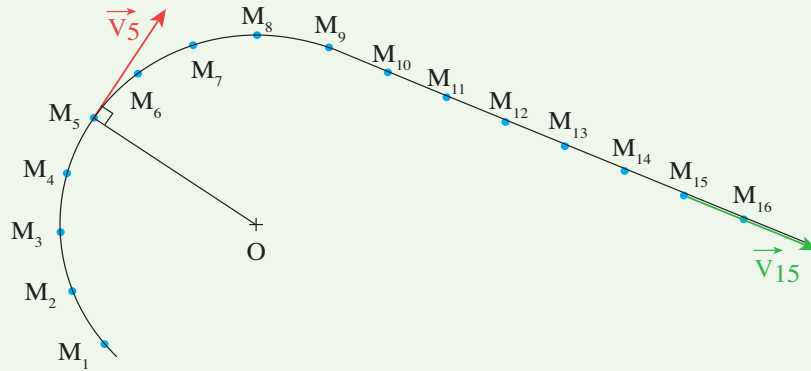
La flèche représentant le vecteur vitesse en M_{15} doit donc avoir une longueur de $0,80/0,4 = 2,0$ cm.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On représente les vecteurs vitesse demandés sur la figure ci-dessous :



11 Trajet autoroutier

Énoncé
p. 144

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 :

$$v = \frac{40}{\frac{2}{3}} = 60 \text{ km.h}^{-1}.$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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

→ Énoncé
p. 144

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.

13 La mouche et le coche

→ Énoncé
p. 145

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.

CORRIGÉS

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

 Énoncé
p. 145

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 :

$$v_A = \frac{272}{3,6} = 75,6 \text{ m.s}^{-1} \quad \text{et} \quad t_A = \frac{701}{75,6} = 9,27 \text{ s.}$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

De la même manière nous avons, pour le pilote B :

$$v_B = \frac{285}{3,6} = 79,2 \text{ m.s}^{-1} \text{ et } t_B = \frac{751}{79,2} = 9,48 \text{ s.}$$

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 :

$$\frac{d_A}{v_A} = t_B \text{ soit : } v_A = \frac{d_A}{t_B} = \frac{701}{9,48} = 73,9 \text{ m.s}^{-1}.$$

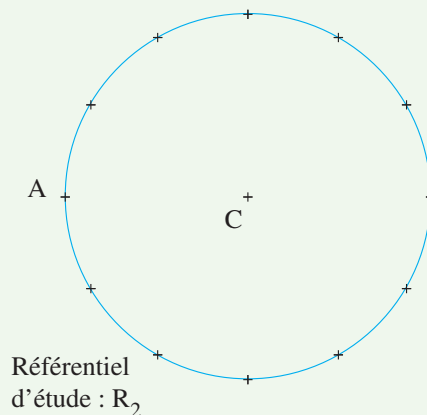
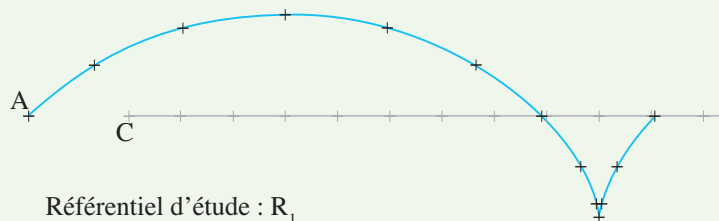
On exprime à présent ce résultat en kilomètres par heure. Nous avons : $v_A = 73,9 \times 3,6 = 266 \text{ km.h}^{-1}$. Il faudrait que la vitesse du pilote A soit 266 km.h^{-1} pour que les deux voitures arrivent ex-æquo.

15 Roue de vélo

Lycée Ampère, Lyon

Énoncé
p. 145

- 1** Les trajectoires des deux points A et C sont reportées sur les figures suivantes.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 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

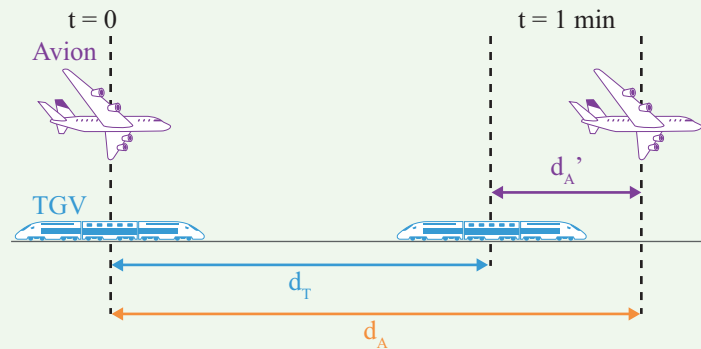
➔ Énoncé
p. 147

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 :
- $$d_T = t v_T = 60 \times 83,3 = 5,00 \times 10^3 \text{ m}.$$

DÉCRIRE UN MOUVEMENT • CHAP. 8

- (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 :

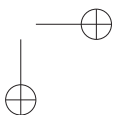
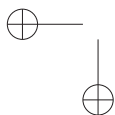
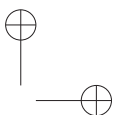
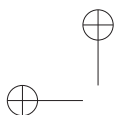
$$v'_A = 22,7 \times 3,6 = 82 \text{ km.h}^{-1}.$$

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

9

Forces et principe d'inertie

Plan du chapitre

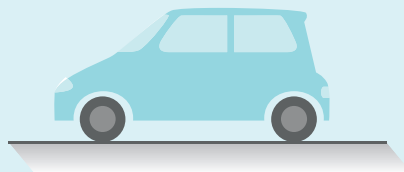
1. Introduction
2. Effet d'une force sur le mouvement d'un corps
3. Principe d'inertie
4. Principe des actions réciproques
5. Quelques forces particulières
6. Actions à distance et actions de contact

1 Introduction

Exercice type

Lycée Saint-Martin, Pontoise

La voiture représentée ci-dessous, de poids 6 000 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 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 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 166

Ce chapitre introduit la notion de force et le principe d'inertie. On donne une condition d'équilibre 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.

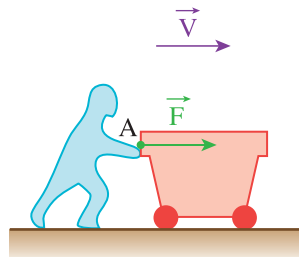


Figure 9.1 – La force exercée par l'opérateur accélère le wagonnet.
Le wagonnet accélère. Sa trajectoire n'est pas modifiée (elle reste une droite).

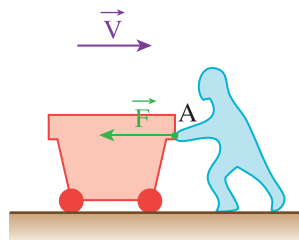


Figure 9.2 – La force exercée par l'opérateur freine le wagonnet.

- *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).

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

2.3 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.

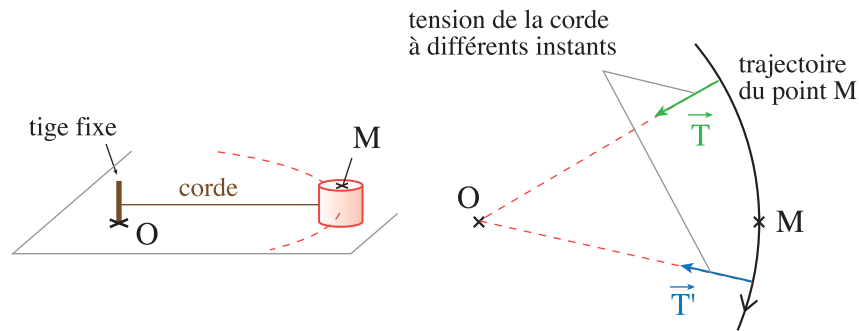


Figure 9.3 – Le mobile autoporteur a une trajectoire circulaire.

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.

Remarque : 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, la vitesse du wagonnet de gauche va augmenter beaucoup plus rapidement, puisqu'il est vide.

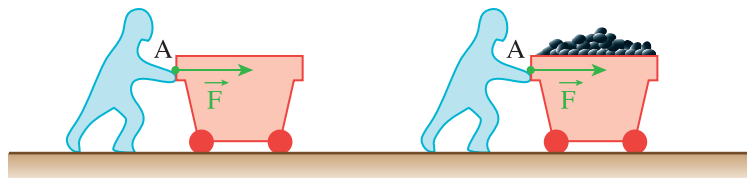


Figure 9.4 – Accélérer le wagonnet de gauche est plus facile.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3 Principe d'inertie

3.1 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.

La contraposée de ce principe implique que si un corps n'est pas en mouvement rectiligne uniforme dans un référentiel galiléen, c'est qu'il est soumis à des forces qui ne se compensent pas (c.-à-d. de somme vectorielle non nulle).

Remarque : 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 suivante.

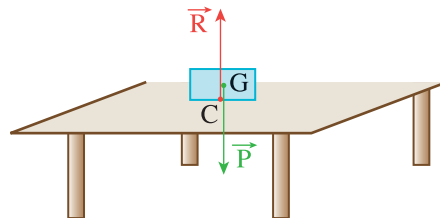


Figure 9.5 – L'objet est au repos sur la table donc soumis à des forces qui se compensent.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

3.3 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.

4 Principe des actions réciproques

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 « principe des actions réciproques », « principe 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.

5 Quelques forces particulières

5.1 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 $g \approx 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$, et où m est la masse du système.

5.2 Tension d'une corde

Une corde tendue exerce sur ce qui la tend à ses extrémités une force, appelée tension, parallèle à la corde.

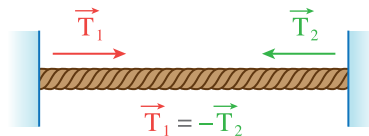


Figure 9.6 – Tension exercée par une corde.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

La tension de la corde à ses extrémités a même valeur et même direction, mais des sens opposés :

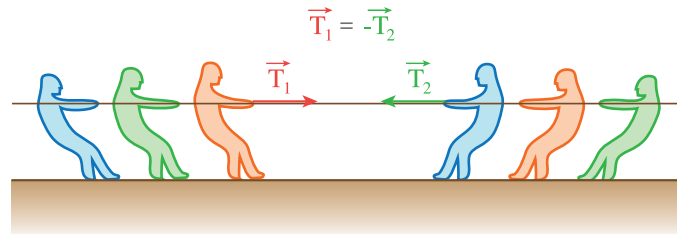


Figure 9.7 – La tension a même valeur aux deux extrémités de la corde.

6 Actions à distance et actions de contact

On peut séparer les forces en deux grandes familles : celles qui s'exercent à distance (c'est le cas de la force gravitationnelle, que nous reverrons plus en détail au chapitre suivant) et celles qui ne s'exercent entre deux systèmes que si ceux-ci sont en contact. Ainsi, la réaction du support, la tension d'un fil, etc. sont des actions de contact.

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).

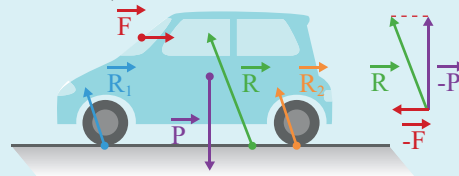


Figure 9.8 – Bilan des forces s'exerçant sur la voiture.

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 161

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 175

- 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 sa 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

2 Dynamomètre



5 min

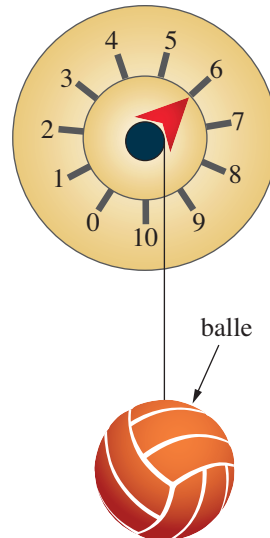
Corrigé
p. 175

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 Bille d'acier



5 min

Corrigé
p. 175

Lycée Stanislas, Paris

Une bille en acier, accrochée à un fil, est attirée par un aimant (voir illustration page suivante).

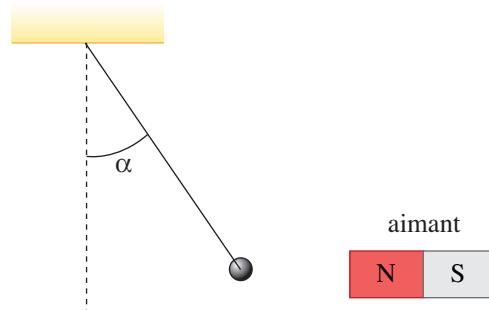
Représenter sur le schéma les différentes forces auxquelles est soumise la bille en équilibre. On admettra que la force exercée par l'aimant est dirigée vers celui-ci.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS



4 Skieur en descente

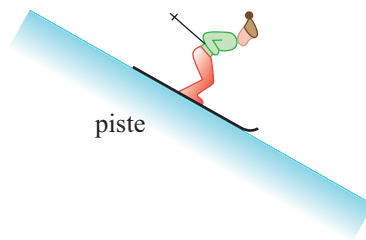


5 min

Corrigé
p. 176

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.

5 Mouvement d'une voiture



10 min

Corrigé
p. 177

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.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

6 Principe d'inertie



15 min

Corrigé
p. 177

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).

7 Échelle et mur

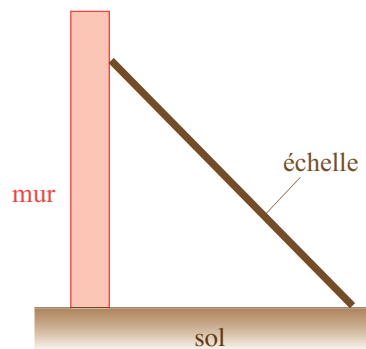


5 min

Corrigé
p. 178

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.



8 Glissement sans frottement



10 min

Corrigé
p. 179

Lycée Saint-Martin, Pontoise

On considère un palet de hockey sur glace, immobile, sur un sol glacé horizontal. Sa masse est $m = 100 \text{ g}$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

- 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.

9 Singe et liane

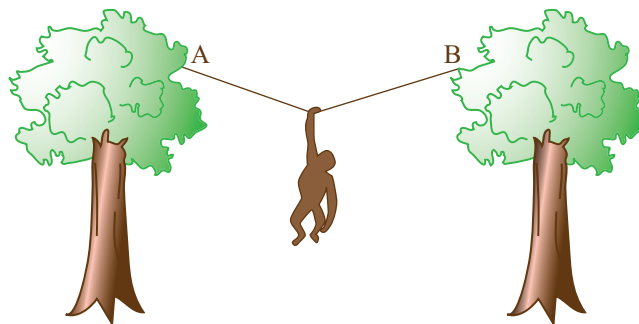


10 min

Corrigé
p. 180

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 ?

10 Trajectoire balistique



20 min

Corrigé
p. 180

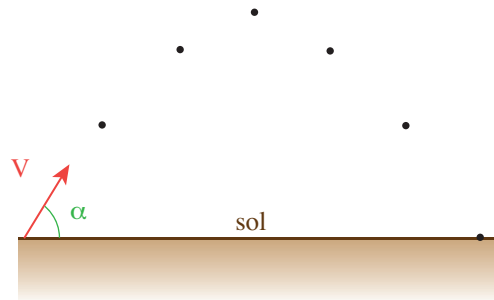
Lycée Saint François de Sales, Évreux

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 (voir schéma page suivante).

- 1 En utilisant le principe de l'inertie, montrer que le solide n'est pas soumis à des forces qui se compensent.
- 2 En un point quelconque de la trajectoire, représenter et nommer la force qui agit sur le solide.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

- 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 ?



11 Mobile autoporteur



10 min

Corrigé
p. 181

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.

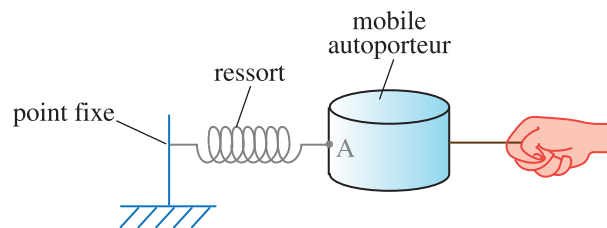


Figure 9.9 – Dispositif expérimental.

- 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 ? Quelles sont les caractéristiques du mouvement du mobile après la rupture ?
- 3 Ce mouvement peut être étudié par l'enregistrement représenté page suivante.
 - (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 ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

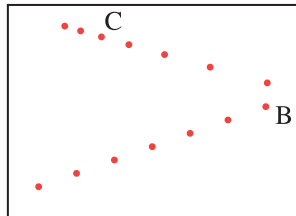


Figure 9.10 – Enregistrement de la trajectoire du mobile autoporteur.

12 Balistique d'une bille



15 min

Corrigé
p. 182

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 $t = 2,0 \text{ s}$.

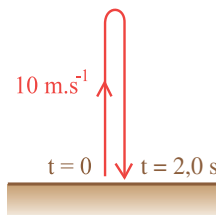


Figure 9.11 – Trajectoire schématique de la bille.

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 $(10 \text{ m.s}^{-1}; 10 \text{ m.s}^{-1})$.

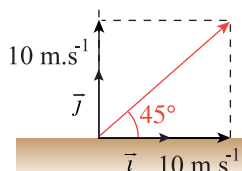


Figure 9.12 – La bille est lancée avec un angle de 45° par rapport à l'horizontale.

- 1 Comment qualifier la trajectoire de la bille dans le premier cas ?
- 2 Représenter schématiquement la trajectoire de la bille dans le second cas.
- 3 Au bout de combien de temps touche-t-elle le sol ?
- 4 À quelle distance de son point de départ touche-t-elle le sol ?

13 Mobile autoporteur



15 min

Corrigé
p. 183

Lycée Bergson, Paris

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

On considère l'enregistrement d'un mobile autoporteur représenté ci-dessous :



Figure 9.13 – 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 ?

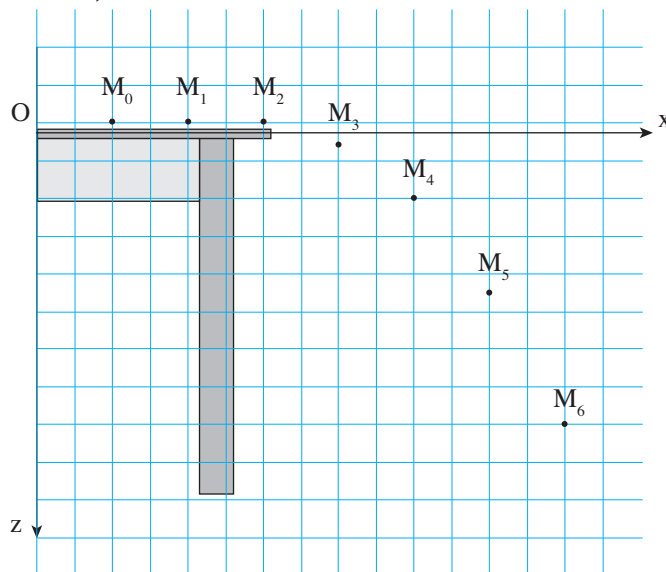
14 Chronophotographie d'une bille



20 min

Corrigé
p. 185

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 $1/20^e$ (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.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 167

- 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.

2 Dynamomètre

Énoncé
p. 167

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 $P = 6 \text{ N}$.
- 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 Bille d'acier

Énoncé
p. 167

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 :

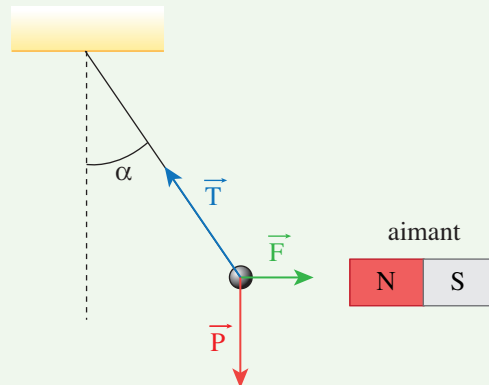
$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}.$$

On les représente sur la figure page suivante.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



MÉTHODE

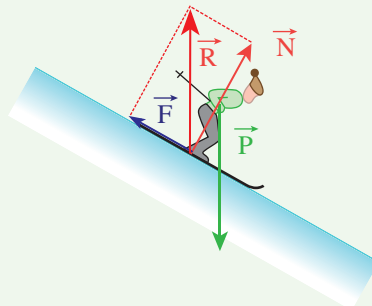
Graphiquement, il faut d'abord représenter soit la force horizontale (celle de l'aimant) ou verticale (le poids), puis représenter la tension de la corde (de manière à ce que sa projection sur l'axe de la première force compense celle-ci). Cela permet d'obtenir la projection sur l'autre axe, de manière à ce que la somme vectorielle des trois forces s'annule exactement.

4 Skieur en descente

Énoncé
p. 168

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.



FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

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.

5 Mouvement d'une voiture

Énoncé
p. 168

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 9.14.

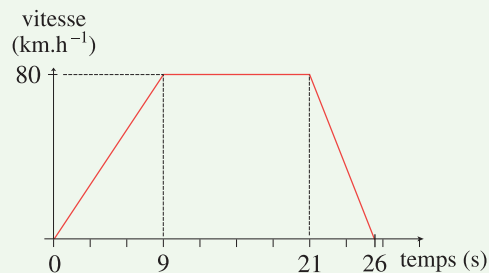


Figure 9.14 – Vitesse de la voiture en fonction du temps.

6 Principe d'inertie

Énoncé
p. 169

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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.

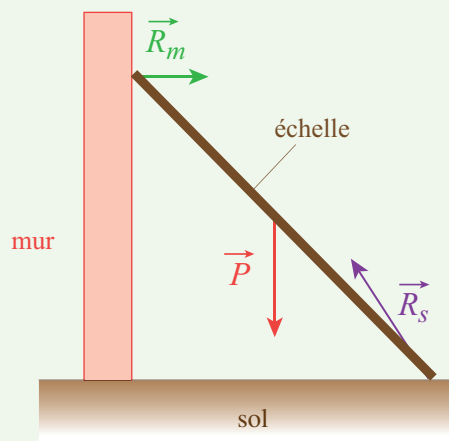
- (d) On se place à nouveau dans le référentiel terrestre. Dans ce référentiel, la trajectoire du touriste n'est pas rectiligne. Cela suffit à assurer que les forces s'exerçant sur lui ne se compensent pas, par application du principe d'inertie. Notons que comme à la question précédente, il est exclu 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.

7 Échelle et mur

Énoncé
p. 169

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.



FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

8 Glissement sans frottement

Énoncé
p. 169

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 : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

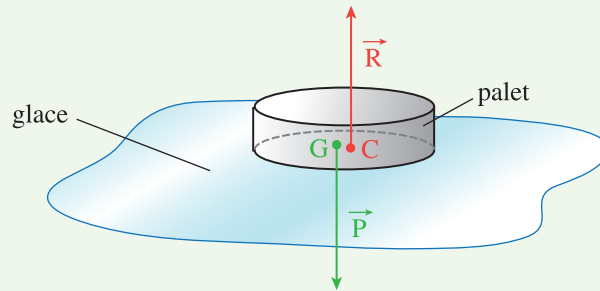


Figure 9.15 – Le palet est au repos donc soumis à des forces qui se compensent.

- 2 Si on frappe le palet tangentielllement 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.

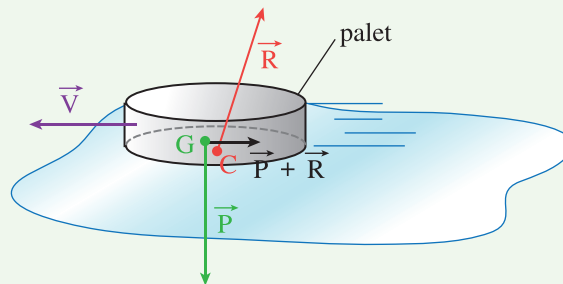


Figure 9.16 – Les deux forces exercées sur le palet ne se compensent pas et la vitesse du palet varie.

COURS

INTERROS

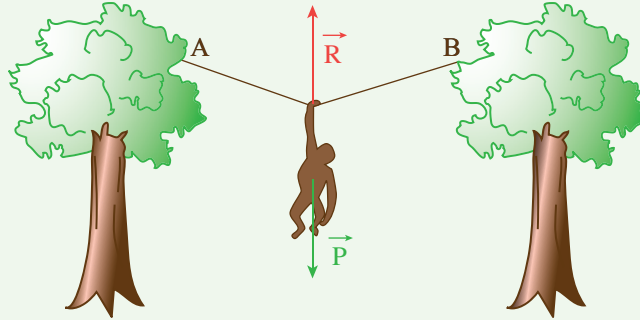
CORRIGÉS

9 Singe et liane

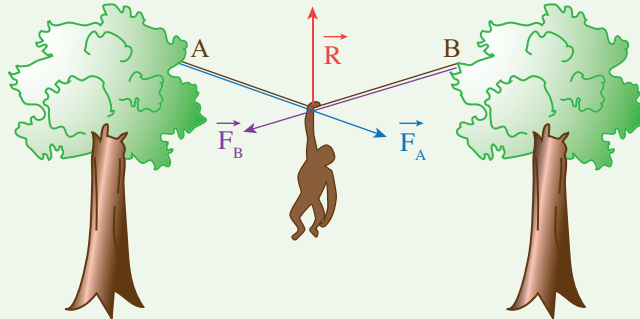
Énoncé
p. 170

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 page ci-contre.



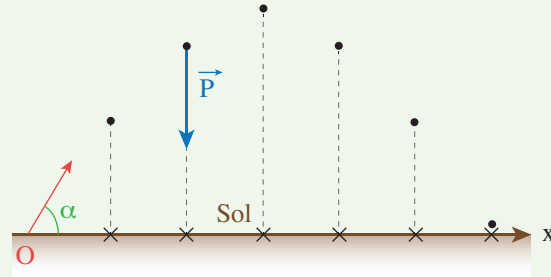
10 Trajectoire balistique

Énoncé
p. 170

Lycée Saint François de Sales, Évreux

- 1 Si le solide était soumis à des forces qui se compensent, 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.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9



- 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.

11 Mobile autoporteur

Énoncé
p. 171

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 9.17. Les forces horizontales s'annulent deux à deux : $\vec{T}_1 + \vec{T}_2 = \vec{0}$, et les forces verticales également : $\vec{P} + \vec{R} = \vec{0}$.

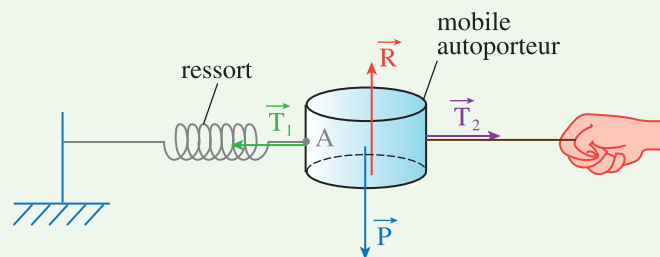


Figure 9.17 – Bilan des forces exercées sur le mobile autoporteur.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- 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.

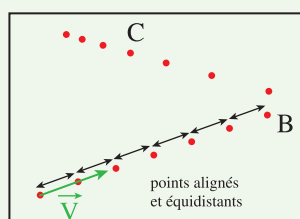


Figure 9.18 – Dans la première partie, le mouvement est rectiligne uniforme.

- (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.

12 Balistique d'une bille

Lycée Pierre d'Aragon, Muret

Énoncé
p. 172

- 1** Dans le premier cas la trajectoire de la bille est rectiligne (mais non uniforme).
- 2** La bille effectue la trajectoire représentée sur la figure page suivante. Il sera montré dans les classes ultérieures que cette trajectoire est une parabole.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

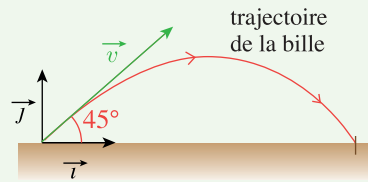


Figure 9.19 – Trajectoire de la bille.

- 3 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 $t = 2 \text{ s}$.
- 4 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 :

$$d = v \times t = 10 \times 2 = 20 \text{ m}.$$

13 Mobile autoporteur

Énoncé
p. 172

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 page suivante (en prenant $t_1 = 50 \text{ ms}$).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 :

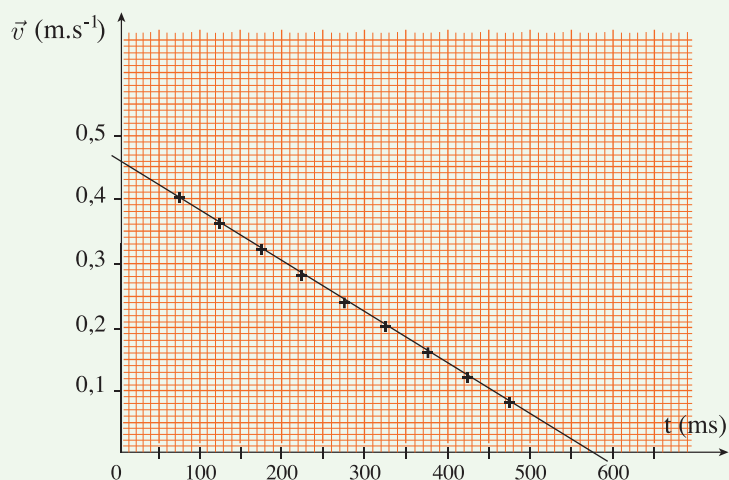


Figure 9.20 – Graphe de la vitesse en fonction du temps.

On constate que ce graphe est une droite ; la vitesse diminue donc régulièrement au cours du temps.

FORCES ET PRINCIPE D'INERTIE • CHAP. 9

14 Chronophotographie d'une bille

Énoncé
p. 173

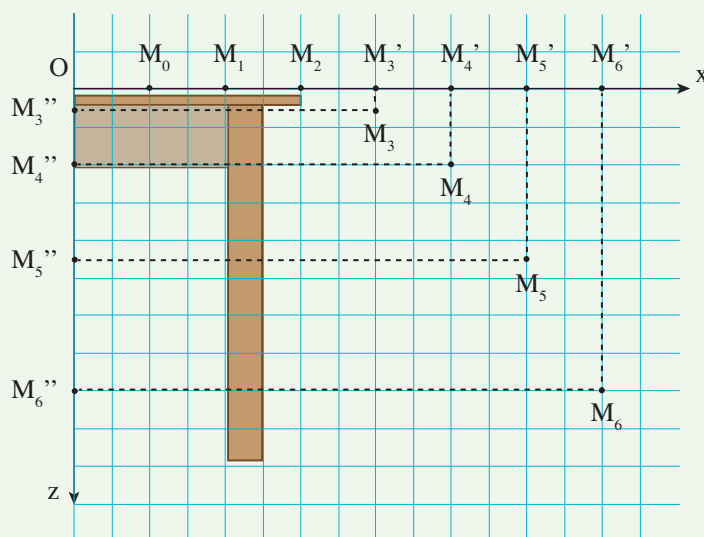
Lycée Lavoisier, Paris

- 1 (a) Les points M_0 et M_2 sont séparés par la distance $d = 2 \text{ cm}$, ce qui correspond à une distance parcourue par la bille de $d' = 20 \times d$, soit $d' = 40 \text{ cm}$. 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).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- (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.

Chapitre 10

L'interaction gravitationnelle

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Interaction gravitationnelle entre deux masses ponctuelles
3. Poids d'un corps

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 190

Ce chapitre aborde l'une des quatre interactions fondamentales de la physique : l'interaction gravitationnelle. Nous allons voir entre autres que le poids des objets sur Terre n'est autre que le résultat de leur interaction gravitationnelle avec la Terre.

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 .

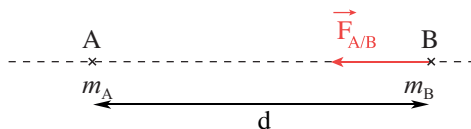


Figure 10.1 – Force exercée par la masse ponctuelle A sur la masse ponctuelle B.

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.

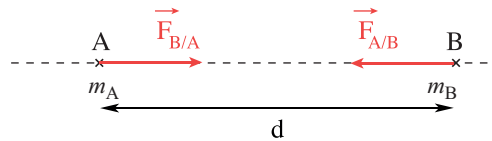


Figure 10.2 – Les deux forces sont de valeurs égales et de sens opposés.

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.

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

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.

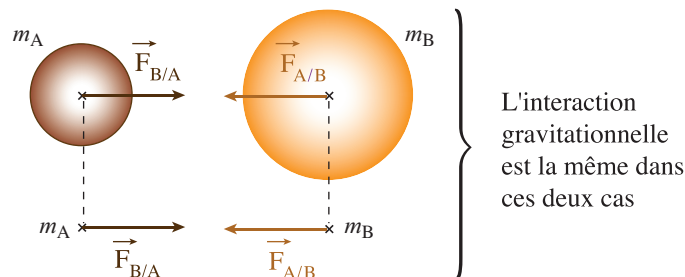


Figure 10.3 – Interaction gravitationnelle entre deux astres à symétrie sphérique.

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 :

$$P = \frac{G \times M \times m}{R^2},$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 $g \approx 9,8 \text{ N.kg}^{-1}$. 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 :

$$P = m \times g.$$

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Jean Prévost, Montevilliers

D'après le cours, l'interaction gravitationnelle entre cette masse et l'astre à symétrie sphérique est donnée par :

$$F = \frac{\mathcal{G} \times M \times m}{R^2},$$

où M est la masse de l'astre. On en déduit :

$$M = \frac{F \times R^2}{\mathcal{G} \times m} = \frac{20 \times (10^4 \times 10^3)^2}{6,67 \times 10^{-11} \times 1,0} = 3,0 \times 10^{25} \text{ kg}.$$

Cette masse représente cinq fois la masse de la Terre.

Voir énoncé page 187

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 197

- 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 Un astronaute a le même poids sur deux planètes A et B. La masse de la planète A est quatre fois plus importante que celle de la planète B. Le rayon de la planète A est :
☐ a quatre fois plus petit que celle de la planète B
☐ b quatre fois plus grand que celle de la planète B
☐ c seize fois plus grand que celle de la planète B
☐ d deux fois plus grand que celle de la planète B
☐ e quatre fois plus petit que celle de la planète B
- 3 Lorsqu'il se pèse sur la planète A, l'astronaute de la question précédente exerce sur celle-ci une force F_A . Lorsqu'il se pèse sur la planète B, la force qu'il exerce sur cette planète est :
☐ a supérieure à F_A .
☐ b égale à F_A .
☐ c inférieure à F_A .

2 Orbite basse



5 min

Corrigé
p. 197

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. 197

Lycée Pasteur, Neuilly

Dans cet exercice, 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.

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 : $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Poids sur différents astres



10 min

Corrigé
p. 198

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 :
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

5 Boules de pétanque



10 min

Corrigé
p. 199

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 :

- $g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$.
- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

6 Poids sur une autre planète



15 min

Corrigé
p. 200

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 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 G , M et R .
- 5 Effectuer l'application numérique pour la Terre, puis pour Saturne.

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

- Données :
- $M_{\text{Terre}} = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$.
 - $R_{\text{Terre}} = 6\,400 \text{ km}$.
 - $M_{\text{Saturne}} = 5,68 \times 10^{26} \text{ kg}$.
 - $R_{\text{Saturne}} = 60\,268 \text{ km}$.
 - $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

7 Force entre deux étoiles



15 min

Corrigé
p. 200

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 :
- $1 \text{ U.A.} = 1,50 \times 10^8 \text{ km}$.
 - $M_S = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$.
 - $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.kg}^{-2}.\text{m}^2$.

8 Force entre le Soleil et la Terre



15 min

Corrigé
p. 201

Lycée Les Fauvettes, Cannes

On considère le système Terre-Soleil.

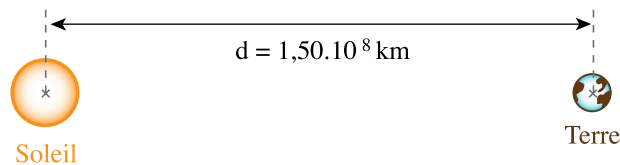


Figure 10.4 – Le système Terre-Soleil (l'échelle n'est pas respectée).

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 $2 \times 10^{22} \text{ N}$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- Données :
- Masse de la Terre : $M_T = 6,0 \times 10^{24}$ kg.
 - Masse du Soleil : $M_S = 2,0 \times 10^{30}$ kg.
 - Constante universelle de la gravitation :
 $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11}$ N.kg⁻².m².

9 Exoplanète CoRoT-7b



20 min

Corrigé
p. 202

Lycée Descartes, Tours

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

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 $m = 1$ kg situé à sa surface.
- 3 En déduire la valeur du champ de pesanteur à la surface de cette planète.

- Données :
- Masse du Soleil : $M_S = 2,00 \times 10^{30}$ kg.
 - Masse de Jupiter : $M_J = 1,90 \times 10^{27}$ kg.
 - Diamètre équatorial de Jupiter : $D_J = 142\,984$ km.
 - Constante de la gravitation : $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11}$ kg⁻¹.m³.s⁻².

10 Chute de la Lune sur la Terre

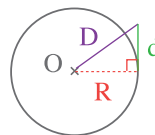
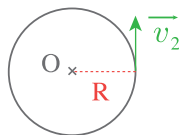


35 min

Corrigé
p. 203

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 distance parcourue par la Lune en un intervalle de temps $\Delta t = 1$ 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 ?

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

- 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.

11 Fusée vers Mars



20 min

Corrigé
p. 205

Lycée Pasteur, Neuilly

Dans cette première partie, on se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Une fusée décolle vers le ciel en projetant des gaz vers le sol.

- 1** La fusée exerce-t-elle une force sur les gaz ?
- 2** Faire le diagramme objet-interactions du système {fusée}.
- 3** On note $\vec{F}_{\text{gaz/fusée}}$ la force exercée par les gaz sur la fusée.
 - (a)** Déterminer le sens et la direction de $\vec{F}_{\text{gaz/fusée}}$.
 - (b)** Déterminer le sens et la direction de $\vec{F}_{\text{fusée/gaz}}$.
 - (c)** Comparer les normes des deux forces en justifiant votre raisonnement.

On se place dans le référentiel lié au centre de la planète Mars, que l'on supposera galiléen, et on considère que la fusée suit une orbite circulaire

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

autour de Mars avec une vitesse de norme constante. On suppose de plus qu'elle n'éjecte plus de gaz.

On notera m_1 la masse de Mars et m_2 celle de la fusée.

- 4 Les actions autres que celles de Mars sur la fusée sont négligeables. En déduire si la fusée est soumise à des forces qui se compensent.
- 5 En déduire, en justifiant, si le vecteur vitesse de la fusée varie. Si c'est le cas, quelle(s) caractéristique(s) du vecteur vitesse de la fusée varie(nt) ?
- 6 Représenter la situation par un schéma sans se soucier de l'échelle de représentation des vecteurs forces et vitesse.
- 7 Avant de se mettre en orbite, la fusée se rapproche de Mars. Lorsque la fusée est à une distance $d_1 = 20\,000$ km du centre de Mars, elle ressent une force de norme $F_1 = 150$ N. Lorsque la fusée est à une distance $d_2 = 10\,000$ km du centre de Mars, elle ressent une force de norme $F_2 = 600$ N.

En déduire si l'expression mathématique de la force d'interaction gravitationnelle est :

$$F_g^a = G \times \frac{m_1 \times m_2}{d}$$

ou :

$$F_g^b = G \times \frac{m_1 \times m_2}{d^2},$$

en expliquant bien le raisonnement.

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

1 **QCM** Testez vos connaissances

Énoncé
p. 191

- 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 **d**. Le rapport du carré des rayons doit être égal au rapport des masses, de manière à ce que le poids reste le même.
- 3 **b**. La force exercée par l'astronaute sur la planète a pour norme son propre poids (en vertu du principe des actions réciproques). Comme il a le même poids sur les deux planètes, il exerce une force de même norme sur la planète B.

2 **Orbite basse**

Énoncé
p. 191

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 :

$$N = \frac{4,7 \times 10^8}{6\,282} \approx 7,5 \cdot 10^4 \text{ orbites}.$$

Nous gardons deux chiffres significatifs puisque c'est la précision avec laquelle est donnée la durée de la mission.

3 **Force gravitationnelle**

Énoncé
p. 191

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

L'intensité de ces forces est donnée par :

$$F = F_{R/P} = F_{P/R} = \frac{\mathcal{G} \times M \times m}{d^2}.$$

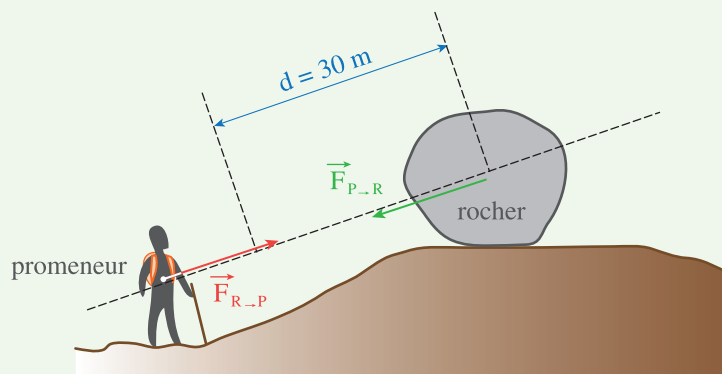


Figure 10.5 – La force exercée par le rocher sur le promeneur a même intensité, et sens contraire, à la force exercée par le promeneur sur le rocher.

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.

4 Poids sur différents astres

Énoncé
p. 192

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 :

$$P = F = \frac{\mathcal{G} \times M \times m}{R^2},$$

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

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 $m_1 = \frac{P_1}{g} \approx 27$ kg.

Dans le cas de la Lune, l'application numérique donne :

$$P_2 = \frac{6,67 \times 10^{-11} \times 7,37 \times 10^{22} \times 70,0}{(1\,738 \times 10^3)^2} = 114 \text{ N.}$$

Ceci est sur Terre le poids d'une masse $m_1 = \frac{P_2}{g} \approx 12$ kg.

Le poids de cet homme sur Terre est $P = mg = 686$ 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).

5 Boules de pétanque

➔ Énoncé
p. 192

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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Poids sur une autre planète

Énoncé
p. 192

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 :

$$F = \frac{G \times M \times m}{R^2}.$$

- 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 :

$$\begin{aligned} P &= m \times g \\ \text{et } P &= m \times \frac{G \times M}{R^2}, \end{aligned}$$

d'où l'on déduit que l'on a :

$$g = \frac{G \times M}{R^2}.$$

- 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.

7 Force entre deux étoiles

Énoncé
p. 193

Lycée Buffon, Paris

- 1 La force exercée par l'étoile la plus massive sur la moins massive est égale à :

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{G \times M_1 \times M_2}{d^2}.$$

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

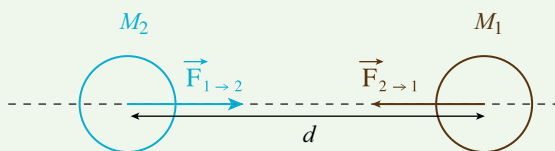


Figure 10.6 – Forces exercées par chaque étoile sur sa compagne.

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 : $F_{1 \rightarrow 2} = F_{2 \rightarrow 1} \approx 1,6 \times 10^{30} \text{ N.}$

8 Force entre le Soleil et la Terre

Énoncé
p. 193

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 : $\frac{3,6}{2} = 1,8 \text{ cm.}$ On en déduit le schéma suivant :



Figure 10.7 – La force exercée par le Soleil sur la Terre et la force exercée par la Terre sur le Soleil ont même valeur.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

9 Exoplanète CoRoT-7b

Énoncé
p. 194

Lycée Descartes, Tours



- 1 La masse maximale de l'étoile hôte de CoRoT-7b est

$$M_*^{\max} = (0,93 + 0,03) \times M_S = 1,92 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

De la même manière, sa masse minimale est :

$$M_*^{\min} = (0,93 - 0,03) \times M_S = 1,80 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

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.

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

10 Chute de la Lune sur la Terre

Énoncé
p. 194

Lycée Stanislas, Paris

- 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.

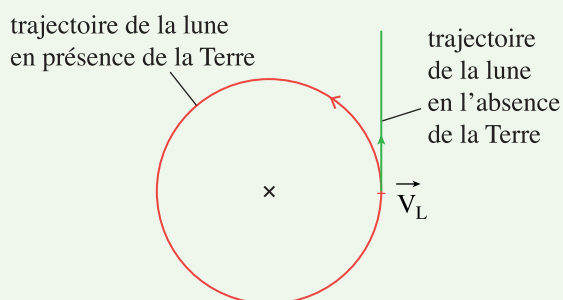


Figure 10.8 – Trajectoire de la Lune en présence et en l'absence de la Terre.

- 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 :

$$D = \sqrt{R^2 + v_L^2 \Delta t^2}.$$

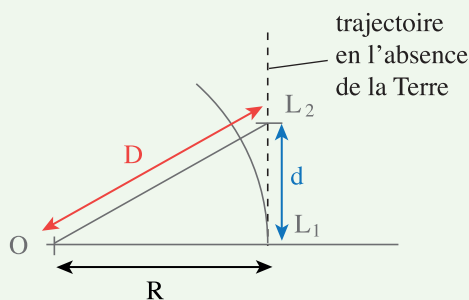


Figure 10.9 – En l'absence de la force gravitationnelle de la Terre, la Lune s'éloignerait de la Terre.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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.

L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE • CHAP. 10

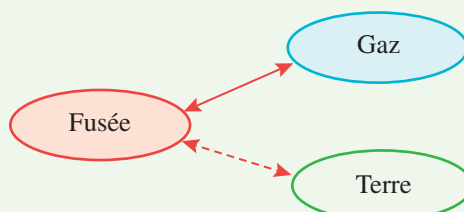
D'un autre côté, la Lune est située 60 fois plus loin que la surface terrestre du centre de la Terre, donc l'interaction gravitationnelle d'un corps au niveau de l'orbite de la Lune est $60^2 = 3\,600$ fois plus petite qu'à la surface de la Terre. On voit ici manifestement le lien entre interaction gravitationnelle et mouvement de chute (lié au poids), et de manière plus générale comment l'action d'une force est directement liée à la variation du vecteur-vitesse du système.

11 Fusée vers Mars

Lycée Pasteur, Neuilly

Énoncé
p. 195

- 1 La fusée monte car les gaz éjectés exercent une force de poussée sur la fusée. Si les gaz exercent une force sur la fusée, d'après le principe de l'action et de la réaction, il existe également une force de même intensité qui s'exerce de la fusée sur les gaz. La fusée exerce donc une force sur les gaz.
- 2 Le diagramme est indiqué ci-dessous.

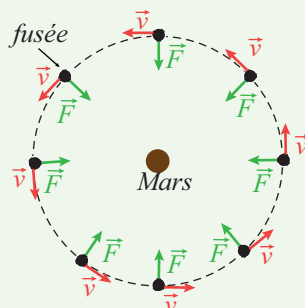


- 3
 - (a) Cette force est verticale, de bas en haut (elle fait monter la fusée).
 - (b) Cette force est verticale, de haut en bas (elle est opposée à la force précédente d'après le principe de l'action et de la réaction).
 - (c) Ces deux forces sont égales en norme, d'après le principe de l'action et de la réaction.
- 4 La fusée est uniquement soumise à l'attraction de la planète Mars. Elle est donc soumise à une force unique et non à des forces qui se compensent. Cela est confirmé par la trajectoire de la fusée : la trajectoire n'est pas rectiligne uniforme (elle est circulaire). D'après le principe d'inertie, elle n'est donc pas soumise à des forces qui se compensent.
- 5 Comme le mouvement n'est pas rectiligne uniforme, on en déduit que le vecteur vitesse varie au cours du temps. Il est indiqué dans l'énoncé que la norme de la vitesse est constante. Le vecteur vitesse varie en direction et en sens (mais pas en norme).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



- 6** Lorsque la fusée se rapproche de Mars, cela ne fait varier ni m_1 (la masse de Mars), ni m_2 (la masse de la fusée), ni G (la constante de gravitation universelle).

Si la première formule était la bonne, le produit $F \times d$ ne devrait donc pas varier (puisque $F \times d = G \times m_1 \times m_2$).

Or,

$$F_1 \times d_1 = 150 \times 20\,000 = 3\,000\,000 = 3 \times 10^6 \text{ N.km}^2$$

alors que :

$$F_2 \times d_2 = 600 \times 10\,000 = 6\,000\,000 = 6 \times 10^6 \text{ N.km}^2.$$

Cette hypothèse n'est donc pas valide.

Si la seconde formule est la bonne, c'est le produit $F \times d^2$ qui ne varie pas.

Cette fois, on a bien :

$$F_1 \times d_1^2 = 150 \times 20\,000^2 = 60\,000\,000\,000 = 6 \times 10^{10} \text{ N.km}^2$$

et

$$F_2 \times d_2^2 = 600 \times 10\,000^2 = 60\,000\,000\,000 = 6 \times 10^{10} \text{ N.km}^2.$$

La formule est donc possible.

Cette formule est juste : elle correspond à la *loi de la gravitation universelle de Newton*.

Chapitre

11

L'atome et son noyau

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Structure de l'atome et de son noyau

1 Introduction

Exercice type

Lycée Picpus, Paris

On considère un atome de cobalt ${}^{60}_{27}\text{Co}$.

- 1 Quel est son nombre de masse ?
- 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 209

Dans ce chapitre nous introduisons des notions relatives à l'atome et son noyau.

2 Structure de l'atome et de son noyau

Un atome est composé d'un cortège d'électrons autour d'un noyau. Le noyau est composé de nucléons, qui sont des protons et des neutrons.

Les neutrons, comme leur nom l'indique, n'ont pas de charge électrique : ils sont électriquement neutres.

Les protons ont une charge électrique positive. Les électrons ont une charge électrique négative, opposée à celle des protons.

À RETENIR

Un atome est électriquement neutre. Son cortège électronique contient donc autant d'électrons qu'il y a de protons dans son noyau.

Dans les unités du Système International, la charge électrique s'exprime en coulomb, de symbole C.

La charge électrique du proton est :

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

La charge électrique d'un électron est donc $-e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

➡ 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 (ou encore nombre de masse), et on note A , le nombre total de nucléons (neutrons et protons) qu'il y a dans le noyau.

Le noyau contient donc $A - Z$ 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 :



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.

➡ À RETENIR

L'ordre de grandeur de la taille d'un atome est 10^{-10} m . L'ordre de grandeur de la taille d'un noyau atomique est 10^{-15} m .

L'essentiel de la masse d'un atome est concentrée dans son noyau. En effet, la masse du proton est

$$m_p = 1,672622 \times 10^{-27} \text{ kg},$$

celle du neutron est :

$$m_n = 1,674927 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

tandis que celle de l'électron est :

$$m_e = 9,10938 \times 10^{-31} \text{ kg}.$$

L'électron est donc environ 2 000 fois moins massif que le proton ou le neutron.

➡ À RETENIR

La masse m d'un atome est sensiblement égale au nombre de masse multipliée par la masse du neutron : $m = Am_n$

L'ATOME ET SON NOYAU • CHAP. 11

→ 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 :
$$A = N + Z \quad \text{soit :} \quad N = A - Z = 60 - 27 = 33.$$

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 207

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 213

- 1 Quelle particule élémentaire est beaucoup plus légère qu'un proton ?
☐ a Le neutron ☐ b L'électron
- 2 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 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.
- 3 Trouver l'intrus dans la liste ci-dessous.
☐ a Carbone ☐ b Cuivre
☐ c Mercure ☐ d Hélium
☐ e Air ☐ f Uranium

2 Chercher l'intrus

★

5 min

Corrigé
p. 213

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. 213

Lycée François Mauriac, Bordeaux

L'atome de phosphore a pour symbole $^{31}_{15}\text{P}$.

- 1 Donner le nombre de protons (p), de neutrons (n) et d'électrons (e^-) d'un atome de $^{31}_{15}\text{P}$.
- 2 Calculer la masse d'un atome de $^{31}_{15}\text{P}$.
- 3 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.
- 4 Quelles sont vos remarques ? Expliquez pourquoi on appelle A le nombre de masse.
- 5 Quelle est la charge électrique du nuage électronique de l'atome de $^{31}_{15}\text{P}$?

Données : $m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$ $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $m_{e^-} = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

L'ATOME ET SON NOYAU • CHAP. 11

4 Modèle de l'atome d'hydrogène



15 min

Corrigé
p. 214

Lycée Auguste Renoir, Limoges

On considère que le rayon de l'atome d'hydrogène (rayon de Bohr) est de $r_H = 53$ pm, tandis que le rayon de son noyau est $r_N = 0,88$ fm. On souhaite modéliser cet atome en représentant son noyau par un ballon de football de diamètre $d = 20$ cm. À quelle distance de celui-ci faut-il placer l'électron ?

- Données :
- Le préfixe pico (de symbole p), correspond à 10^{-12}
 - Le préfixe femto (de symbole f), correspond à 10^{-15}

5 Modèle de l'atome d'hydrogène



15 min

Corrigé
p. 214

Lycée Monod, Clamart

1 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 cet atome par un symbole.

2 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 $d = 2,8 \times 10^{-10}$ m. On suppose également que le noyau est une sphère dont le diamètre a pour mesure $d' = 2,0 \times 10^{-15}$ m.

- (a) 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 $d'_1 = 67$ 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 ?

6 Chaîne en or



15 min

Corrigé
p. 215

Lycée Monod, Clamart

Une chaîne en or pur a une masse totale $m = 31,5$ grammes. Elle est constituée de $n = 105$ maillons identiques.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

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 :

- $m_{e^-} = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$

L'ATOME ET SON NOYAU • CHAP. 11

1 **QCM** Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 210

- 1 **b**. L'électron est environ 2 000 fois plus léger que le proton.
- 2 (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*.
(d) *Faux*. Leurs masses sont sensiblement égales.
- 3 **e**. C'est le seul qui ne soit pas un élément chimique.

2 Chercher l'intrus

→ Énoncé
p. 210

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

→ Énoncé
p. 210

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

$$m = Zm_N + (A - Z)m_N = Am_N,$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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'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

Énoncé
p. 211

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

Énoncé
p. 211

Lycée Monod, Clamart

- 1 Le symbole de cet atome est ${}^1_1\text{H}$.
- 2 (a) On représente l'atome par un modèle qui est K fois plus grand, où

$$K \text{ est donnée par : } K = \frac{67 \times 10^{-3}}{2,0 \times 10^{-15}} = 3,35 \times 10^{13}.$$

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 :

$$d_1 = K \times d = 9,400 \times 10^3 \text{ m} = 9,4 \text{ km.}$$

- (b) Bien évidemment, un tel modèle est irréalisable.
Le diamètre du modèle de l'électron serait :

$$\frac{9,4 \times 10^3}{10^8} = 94 \times 10^{-6} \text{ m} = 94 \text{ } \mu\text{m.}$$

L'ATOME ET SON NOYAU • CHAP. 11

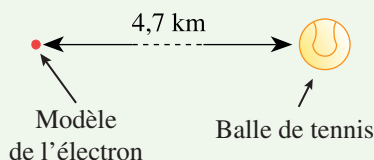


Figure 11.1 – *Modèle de l'atome d'hydrogène.*

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

Énoncé
p. 211

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 :

$$N = \frac{m_M}{m_{\text{Au}}} = \frac{3,00 \times 10^{-4}}{3,30 \times 10^{-25}} = 9,09 \times 10^{20}.$$

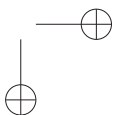
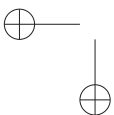
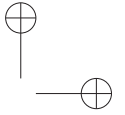
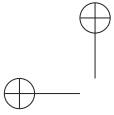
Il y a environ 10^{21} atomes d'or dans un maillon.

Il faut prendre garde à exprimer la masse d'un maillon et celle d'un atome dans les mêmes unités (ici le kilogramme).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre

12

Le cortège électronique

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions

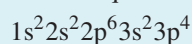
 Retrouvez ce cours en vidéo avec 

1 Introduction

Exercice type

D'après lycée Français, Londres

Donner le numéro atomique et la place dans la classification périodique de l'atome dont la configuration électronique est la suivante :



Voir corrigé page 221

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 sous-couches électroniques

Le nuage électronique entourant un atome ou un ion est structuré en couches et en sous-couches dans laquelle se répartissent les électrons. Elles portent les noms suivant :

1s, 2s, 2p, 3s, 3p.

Les sous-couches s ne peuvent contenir que deux électrons au maximum. Les sous-couches p peuvent en contenir six au maximum.

Remarque : les sous-couches sont également appelées « orbitales ».

Définition 1

La configuration électronique d'un atome ou d'un ion est spécifiée par le nombre d'électrons que contient chacune des couches et sous-couches électroniques.

Pour donner la configuration électronique d'un atome ou d'un ion, on indique le nombre d'électrons dans chaque sous-couche en exposant.

Exemple : dans l'exercice-type, la sous-couche 2s contient 2 électrons, et la sous-couche 3p quatre électrons.

2.2 Détermination de la configuration électronique d'un atome

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 sous-couches de la manière suivante (seuls les cas où $Z < 19$ sont au programme) :

- 1 On remplit les sous-couches dans l'ordre indiqué au paragraphe précédent. On remplit complètement une sous-couche avant d'en changer.
- 2 On respecte le nombre maximal d'électrons par sous-couche (2 pour s et 6 pour p).
- 3 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 ($Z = 7$). Son nuage électronique possède 7 électrons.

Les sous-couches à remplir sont :

1s, 2s, 2p, 3s, etc.

Nous commençons par la couche 1s : elle peut contenir **deux** électrons. Nous indiquons donc :



Où sont les cinq autres électrons de l'atome d'azote ?

La couche suivante, 2s, peut également contenir **deux** électrons. Nous indiquons donc :

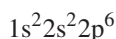


Nous savons donc où se trouvent 4 électrons sur les 7 que contient le nuage électronique. Il nous reste donc **trois** électrons à répartir. La sous-couche suivante est la sous-couche 2p. Elle peut contenir jusqu'à 6 électrons, donc les trois restant vont tous dans cette sous-couche. Nous indiquons donc :

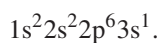


C'est la configuration électronique de l'atome d'azote.

De la même manière nous pouvons déterminer la configuration électronique de tout atome ayant $Z \leq 18$. Ainsi, celle du néon ($Z = 10$) est :



et celle du sodium ($Z = 11$) est :



LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

Cela commence à être long ! On peut condenser cette écriture en remarquant que cette configuration est identique à celle du néon, à laquelle on ajoute $3s^1$. On peut ainsi la noter :



de manière condensée. Lorsqu'on souhaite décrire explicitement cette structure, il suffit de remplacer la partie (Ne) par la configuration électronique du néon.

2.3 Le tableau périodique

La table ou tableau 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 335.

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. Lorsque les sous-couches changent de numéro, on va à la ligne et on décale éventuellement afin que les éléments sur une même colonne aient des propriétés chimiques similaires.

1 1 H Hydrogène $1s^1$							4 2 He Hélium $1s^2$
7 3 Li Lithium $1s^2 2s^1$	9 4 Be Béryllium $1s^2 2s^2$	11 5 B Bore $1s^2 2s^2 2p^1$	12 6 C Carbone $1s^2 2s^2 2p^2$	14 7 N Azote $1s^2 2s^2 2p^3$	16 8 O Oxygène $1s^2 2s^2 2p^4$	19 9 F Fluor $1s^2 2s^2 2p^5$	20 10 Ne Néon $1s^2 2s^2 2p^6$
23 11 Na Sodium $(\text{Ne})3s^1$	24 12 Mg Magnésium $(\text{Ne})3s^2$	27 13 Al Aluminium $(\text{Ne})3s^2 3p^1$	28 14 Si Silicium $(\text{Ne})3s^2 3p^2$	31 15 P Phosphore $(\text{Ne})3s^2 3p^3$	32 16 S Soufre $(\text{Ne})3s^2 3p^4$	35 17 Cl Chlore $(\text{Ne})3s^2 3p^5$	40 18 Ar Argon $(\text{Ne})3s^2 3p^6$

Nombre de nucléons	A	X	Symbole de l'élément
Numéro atomique	Z		
	nom $1s^2$		

Figure 12.1 – Classification périodique des éléments jusqu'à $Z = 18$. On représente en rouge la dernière sous-couche remplie. On voit que la première ligne correspond aux numéros 1, la seconde ligne aux numéros 2, etc.

 Retrouvez la classification périodique des éléments avec 

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

2.4 Quelques familles chimiques

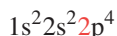
- La première colonne, qui contient par exemple l'hydrogène et le sodium, est la colonne des *alcalins* (à l'exception de l'hydrogène, qui n'est pas formellement un alcalin). Ces éléments n'ont qu'un électron sur leur dernière sous-couche, et ils le perdent facilement pour donner les cations H^+ , Na^+ , 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 sont chimiquement inertes (ils réagissent très peu chimiquement).
- Les éléments de l'avant-dernière colonne sont les *halogènes*. Il leur manque un électron sur leur dernière sous-couche, ils peuvent facilement l'acquérir pour se retrouver dans la configuration électronique du gaz noble immédiatement suivant. Ils deviennent ainsi des anions portant une charge élémentaire. Les ions F^- , Cl^- , Br^- en sont des exemples.

2.5 Comment trouver une position dans le tableau périodique ?

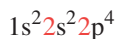
Nous avons vu au paragraphe précédent que le numéro des dernières sous-couches (c.-à-d. les plus à droite) de la configuration électronique nous donnent le numéro de ligne (ou la période) dans le tableau. Comment à présent retrouver la colonne ? Il suffit de compter le nombre d'électrons se trouvant sur les sous-couches de même numéro : c'est le numéro de colonne (que l'on indique souvent par un chiffre romain).

Remarque : Les électrons remplissant les sous-couches de même numéro que la ligne sont appelés les électrons de valence. Le nombre d'électron de valence est donc égal au numéro de la colonne où se trouve l'atome. Nous reverrons cette notion au chapitre suivant.

Exemple : Considérons l'atome de configuration électronique $1s^2 2s^2 2p^4$. Sur quelle ligne se trouve-t-il ? Le numéro de sous-couche le plus à droite est 2 :



Il se trouve donc sur la deuxième ligne. Quel est son numéro de colonne ? On compte les électrons se trouvant sur les sous-couches commençant par 2 :



Nous en avons $2 + 4 = 6$. Il se trouve donc sur la colonne VI.

LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

➔ Solution de l'exercice type

D'après lycée Français, Londres

Le nombre total d'électrons dans cet atome est $2 + 2 + 6 + 2 + 4 = 16$. Le numéro atomique de cet atome est donc : $Z = 16$, puisque le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, l'atome étant électriquement neutre. Le numéro de la sous-couche la plus à droite est 3 (3p), donc il se trouve sur la troisième ligne. Les sous-couches dont le numéro est 3 sont 3s et 3p. Elles contiennent respectivement deux électrons et quatre électrons. L'atome se trouve donc dans la colonne $2 + 4 = 6$.

L'atome se trouve sur la troisième ligne, en colonne VI. En nous aidant du tableau périodique du cours, nous voyons qu'il s'agit du silicium.

Voir énoncé page 217

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 226

- 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 sous-couche 2s peut contenir au maximum deux électrons.
 - d La sous-couche 3s peut contenir au maximum trois électrons.
- 2 Les éléments de la première colonne appartiennent
 - a à la même période
 - b à la même couche
 - c à la même famille

2 Éléments chimiques



5 min

Corrigé
p. 226

Lycée Hoche, Versailles

- 1 Nommer les éléments chimiques correspondant aux symboles suivants :
 - (a) N, Na, Hg, Mg, He, Ar
 - (b) O, C, F, P, S.
- 2 Donner les symboles des éléments suivants :
Zinc, or, cuivre, argent, aluminium, plomb, silicium.

3 Testez vos connaissances



5 min

Corrigé
p. 226

Lycée Jules Verne, Nantes

- 1 Qu'est-ce qu'une période ?
- 2 Quel est le numéro de colonne de la famille :
 - (a) des alcalins ?
 - (b) des halogènes ?
 - (c) des gaz nobles ?

4 Structure atomique



5 min

Corrigé
p. 226

Lycée Janson de Sailly, Paris

Un atome a la configuration électronique suivante : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$.

- 1 Quel est son numéro atomique ?
- 2 Quelle est sa place dans la classification périodique ? (on donnera sa ligne et sa position sur la ligne).
- 3 Sachant que son noyau comporte 14 neutrons, quelle est la masse de cet atome ?

Donnée : masse du neutron : $m_n = 1,675 \times 10^{-27}$ kg.

LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

5 Configurations électroniques



5 min

→ Corrigé
p. 227

Lycée Anna Rodier, Moulins

Donner la configuration électronique des atomes suivant :

- 1 Atome de magnésium ($Z = 12$).
- 2 Atome de fluor ($Z = 9$).

6 Atome de carbone



10 min

→ Corrigé
p. 227

Lycée Lacroix, Maisons-Alfort

On étudie l'atome de carbone 13 : $^{13}_6\text{C}$.

- 1 Combien l'atome de $^{13}_6\text{C}$ contient-il de protons ? De nucléons ? De neutrons ?
 - 2 Combien contient-il d'électrons ?
 - 3 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 $^{13}_6\text{C}$.
 - 4 (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.
 - 5 Quelle est la configuration électronique d'un atome de carbone 13 ?
- Données :
- $m_{e^-} = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$.
 - $m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
 - $m_n = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

7 Identification d'un élément



5 min

→ Corrigé
p. 228

Lycée Thiers, Marseille

Un élément se trouve, dans la classification périodique, en 6^e position de la 2^e période.

- 1 Dédurre la configuration électronique de l'atome correspondant. Justifier.
- 2 Quel est cet élément ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

8 Identification d'un anion



5 min

Corrigé
p. 228

Lycée Pasteur, Neuilly

Un anion a pour configuration électronique $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Il porte une seule charge élémentaire.

- 1 Déterminer la configuration électronique de l'atome dont il dérive.
- 2 Dédire la place de cet atome dans la classification. Justifier.

9 Atome d'oxygène



5 min

Corrigé
p. 229

Lycée Montalembert, Nogent-sur-Marne

Soit l'atome d'oxygène $^{16}_8\text{O}$.

- 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.
- 4 L'ion oxygène est O^{2-} . Indiquer sa configuration électronique.

10 Atome de sodium



5 min

Corrigé
p. 229

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^+ .

11 Qui suis-je ?



10 min

Corrigé
p. 229

Lycée Condorcet, Paris

Pour cet exercice, il sera possible de se référer au tableau périodique page 335.

- 1 Je suis un atome dont la configuration électronique est $1s^2 2s^2 2p^1$. Quel élément suis-je ?
- 2 Ma configuration électronique est $1s^2 2s^2 2p^6$. Je suis un ion porteur de deux charges négatives. Quel ion suis-je ?
- 3 Je suis un atome. J'ai 32 neutrons et la charge électrique de mon noyau est $Q = 4,32 \times 10^{-18} \text{ C}$.
Quelle est ma représentation symbolique ?

Données : charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

12 Configuration électronique



10 min

Corrigé
p. 230

Lycée Paul Langevin, Suresnes

- 1 Compléter le tableau suivant :

Élément	Symbole	Numéro atomique	configuration électronique
Hydrogène		1	
	C		$1s^2 2s^2 2p^2$
Oxygène		8	
Soufre		16	

- 2 Justifier la valeur reportée dans le tableau pour le numéro atomique de l'élément carbone.
- 3 Dédurre de la configuration électronique d'un atome d'oxygène la période à laquelle apparaît cet élément, 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.

13 Identification d'un atome



10 min

Corrigé
p. 231

Lycée Stanislas, Paris

- 1 Un atome a la configuration électronique suivante : $1s^2 2s^2 2p^5$.
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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 222

- 1 (a) *Faux*. Ils sont rangés par numéro atomique croissant.
(b) *Vrai*.
(c) *Vrai*.
(d) *Faux*. Toute sous-couche se terminant par s peut contenir au maximum deux électrons.
- 2 ☒. Les éléments de la première colonne appartiennent à la même famille.

2 Éléments chimiques

Énoncé
p. 222

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 minerais aurifères quand il contient de l'or), Cu, Ag, Al, Pb, Si.

3 Testez vos connaissances

Énoncé
p. 222

Lycée Jules Verne, Nantes

- 1 Une période est une ligne du tableau périodique.
- 2 (a) La famille des alcalins se situe dans 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 colonne de la classification périodique. Elle contient entre autres l'hélium, le néon, l'argon, etc.

4 Structure atomique

Énoncé
p. 222

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 $Z = 13$.

LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

- 2 Le numéro de la dernière sous-couche remplie est 3, donc il se trouve sur la troisième ligne (ou période). Les sous-couches portant le numéro trois sont 3s (avec deux électrons) et 3p (avec un électron), donc il se trouve en colonne $2 + 1 = 3$.

L'atome est en troisième période, colonne III.

- 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 :

$$M \approx Am_n = 27 \times 1,675 \times 10^{-27} = 4,523 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

En effet, protons et neutrons ont une masse très sensiblement égale.

5 Configurations électroniques

Énoncé
p. 223

Lycée Anna Rodier, Moulins

La configuration électronique s'établit en remplissant les sous-couches dans l'ordre, en respectant un nombre maximal de deux électrons dans les sous-couches s et six dans les sous-couches p.

- 1 Nous répartissons dans ce cas 12 électrons, ce qui donne :

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$$

- 2 Nous répartissons dans ce cas 9 électrons, ce qui donne :

$$1s^2 2s^2 2p^5$$

6 Atome de carbone

Énoncé
p. 223

Lycée Lacroix, Maisons-Alfort

- 1 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 : $N = A - Z = 13 - 6 = 7$.

- 2 Il contient $Z = 6$ électrons pour assurer la neutralité électrique.

- 3 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 :

$$M = 13 \times 1,675 \times 10^{-27} = 2,178 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- 4 (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 :

$$M_p = 6 \times 1,672 \times 10^{-27} = 1,003 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

(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 :

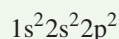
$$M_e = 6 \times 9,109 \times 10^{-31} = 5,465 \times 10^{-30} \text{ kg.}$$

(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.

5 L'atome de carbone comporte 6 électrons. On remplit ses sous-couches dans l'ordre indiqué dans le cours, en respectant un nombre maximum de 2 pour les sous-couches s et 6 pour les sous-couches p. Nous obtenons :

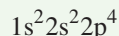


7 Identification d'un élément

Énoncé
p. 223

Lycée Thiers, Marseille

1 Puisque l'élément se trouve sur la 6^e position (ou colonne) de la deuxième ligne, il a au total six électrons sur les sous-couches 2s et 2p. Sachant que la sous-couche 2s en contient deux au maximum, la sous-couche 2p en contient 4. La configuration électronique de cet atome est donc :



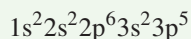
2 Cet élément contient 8 électrons, donc son numéro atomique est $Z = 8$. C'est l'oxygène. On peut aussi le localiser directement sur le tableau périodique si on y a accès.

8 Identification d'un anion

Énoncé
p. 224

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 seul électron à la configuration électronique de l'anion, bien sûr dans la dernière couche, la couche de valence :



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 les sous-couches 3s et 3p).

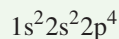
LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

9 Atome d'oxygène

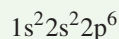
Énoncé
p. 224

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 La configuration électronique s'établit en utilisant la méthode vue en cours : nous remplissons les sous-couches dans l'ordre, en respectant un nombre maximal de deux électrons dans les sous-couches s et six dans les sous-couches p. Nous obtenons :



- 4 L'ion O^{2-} correspond à un atome d'oxygène qui a capté deux électrons supplémentaires, sa configuration électronique est donc :

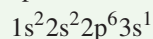


10 Atome de sodium

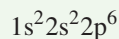
Énoncé
p. 224

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 est neutre, donc il possède 11 électrons. La configuration électronique s'établit en remplissant les sous-couches dans l'ordre, en respectant un nombre maximal de deux électrons dans les sous-couches s et six dans les sous-couches p. Nous obtenons :



L'ion Na^+ correspond à un atome de sodium ayant perdu un électron. Sa configuration électronique est donc :



11 Qui suis-je ?

Énoncé
p. 224

Lycée Condorcet, Paris

- 1 Cet atome est constitué de 5 électrons (2 sur la sous-couche 1s, 2 sur la sous-couche 2s et 1 sur la sous-couche 2p). Comme un atome est électriquement neutre et que la charge d'un proton est l'opposé de la charge d'un électron, cet atome contient 5 protons dans son noyau. Il s'agit donc du 5^e élément de la classification périodique : le Bore.
- 2 Cet ion possède deux électrons de plus que l'atome du même élément chimique. La configuration électronique de l'atome correspondant est donc $1s^2 2s^2 2p^4$. Par un raisonnement similaire à la question précédente, il s'agit du 8^e élément de la classification périodique : l'oxygène. Comme l'ion possède deux charges négatives, il s'agit de l'ion O^{2-} .

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 3 La charge électrique du noyau est égale à la somme des charges de protons qui le constitue. On en déduit que :

$$Q = Z \times e.$$

Donc :

$$Z = \frac{Q}{e} = \frac{4,32 \times 10^{-18}}{1,6 \times 10^{-19}} = 27.$$

Cet élément est le 27^e de la classification périodique. Il s'agit du cobalt (Co). Le nombre de masse A d'un élément est égal à la somme de son nombre de neutrons et de protons. Ainsi,

$$A = Z + N = 27 + 32 = 59.$$

La représentation symbolique de cet élément est donc ${}^{59}_{27}\text{Co}$.

ATTENTION

Le « o » doit être écrit en minuscule pour ne pas confondre un atome de Cobalt (Co) avec une molécule de monoxyde de carbone (CO).

12 Configuration électronique

Énoncé
p. 225

Lycée Paul Langevin, Suresnes

- 1 On complète le tableau en remplissant les sous-couches électroniques avec le nombre d'électrons correspondant au numéro atomique. L'élément de la deuxième ligne est le carbone.

Élément	Symbole	Numéro atomique	Configuration électronique
Hydrogène	H	1	$1s^1$
Carbone	C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Oxygène	O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Soufre	S	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$

- 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 dernière sous-couche de l'oxygène est 2p, donc il se trouve sur la deuxième période. Ses sous-couches de numéro 2 (2s et 2p) comportent au total 6 électrons, donc il se trouve en 6^e position sur cette période.
- 4 Les éléments carbone et oxygène sont tous deux sur la 2^e ligne : ils appartiennent à la même période. Les éléments soufre et oxygène possèdent le même nombre d'électrons sur leur dernière sous-couche, donc ils appartiennent à la même colonne.

LE CORTÈGE ÉLECTRONIQUE • CHAP. 12

13 Identification d'un atome

Énoncé
p. 225

Lycée Stanislas, Paris

1 La dernière sous-couche est la sous-couche 2p, donc l'atome se trouve sur la 2^e période. Les sous-couches de numéro 2 (2s et 2p) contiennent au total $2 + 5 = 7$ électrons, donc il se trouve en 7^e position dans cette période.

2 Le nombre de nucléons de l'atome est $A = Z + N = 2 + 2 + 5 + 8 = 17$.

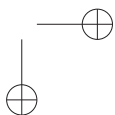
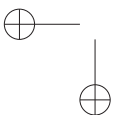
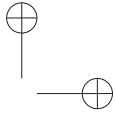
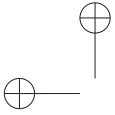
La valeur approchée de la masse de l'atome, qui est concentrée dans le noyau (puisque les électrons sont de masse négligeable) est donnée par :

$$M \approx Am_n = 17 \times 1,675 \times 10^{-27} = 2,848 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Stabilité chimique : ions et molécules

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Un principe général
3. Ions monoatomiques
4. Les molécules
5. Énergie de liaison

1 Introduction

Exercice type

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.

Voir corrigé page 237

Ce chapitre aborde la notion de stabilité chimique. Nous allons voir un principe général, qui nous permettra de comprendre quels types d'ions forment les atomes, ou comment les atomes s'agencent en édifices plus complexes, les molécules.

2 Un principe général

Pour augmenter sa stabilité, un atome a tendance à s'entourer d'un cortège électronique de gaz noble.

Un atome qui ne vérifie pas ce principe général est très instable, hautement réactif et va rapidement donner lieu à une transformation chimique qui lui permettra de satisfaire ce principe. Dans les conditions usuelles, tous les atomes que nous rencontrons satisfont à ce principe, soit se débarrassant d'électrons ou en capturant, de manière à devenir des ions, soit en s'impliquant dans des édifices plus complexes, les molécules. Nous allons étudier ces deux cas plus en détail.

3 Ions monoatomiques

Un atome isolé, pour acquérir une configuration électronique de gaz noble, peut capturer des électrons supplémentaires ou au contraire se débarrasser de certains de ses électrons. Il peut donc acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit ou le précède dans le tableau périodique, et va ainsi former un ion, puisque sa neutralité électrique n'est plus assurée.

À RETENIR

Lorsqu'il forme un ion, un atome a tendance à adopter la configuration du gaz noble le plus proche dans la classification périodique.

Nous pouvons en appliquant ce principe déduire la table suivante. Nous rappelons que pour les éléments figurant au programme les gaz nobles ont pour dernière sous-couche une sous-couche p complète avec 6 électrons.

Élément	configuration électronique	configuration électronique du gaz noble le plus proche
Sodium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$	$1s^2 2s^2 2p^6$
Magnésium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6$
Chlore	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
Fluor	$1s^2 2s^2 2p^5$	$1s^2 2s^2 2p^6$

En comparant les configurations électroniques de l'atome et celle du gaz noble le plus proche, nous pouvons en déduire combien d'électrons sont gagnés ou perdus, ce qui nous donne la formule de l'ion :

Élément	électrons gagnés (+) ou perdus (-)	ion formé	nom
Sodium	-1	Na^+	ion sodium
Magnésium	-2	Mg^{2+}	ion magnésium
Chlore	+1	Cl^-	ion chlorure
Fluor	+1	F^-	ion fluorure

STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

Outre ces électrons, nous mentionnons les ions potassium K^+ et calcium Ca^{2+} . Le potassium et le calcium sont respectivement dans la première et deuxième colonne du tableau périodique, aussi il est logique que la charge de leurs ions soient les mêmes, respectivement, que celles du sodium et du magnésium.

Enfin, l'hydrogène est une exception au principe : il tend à se défaire de son unique électron et n'a de ce fait plus de cortège électronique. Il forme l'ion hydrogène H^+ .

À RETENIR

Un ion chargé positivement est appelé un cation. Un ion chargé négativement est appelé un anion.

4 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 leurs sous-couches externes (celle dont le numéro est celui de la période). Ces électrons de la couche externe sont également appelés électrons de valence, ainsi que nous l'avons vu au chapitre précédent.

Ici, au contraire des ions, il n'est plus question de pouvoir se débarrasser d'électrons, mais au contraire d'en accepter de nouveaux, mis en commun avec d'autres atomes.

À RETENIR

Dans une molécule, chaque atome a tendance à acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit dans le tableau périodique.

Ainsi, la différence avec les ions monoatomiques est « ... qui le suit ... » au lieu de « ... le plus proche ... ».

Lorsque des molécules mettent des électrons en commun pour assurer la stabilité chimique de chacun des atomes, on dit qu'elles établissent des liaisons de valence ou des liaisons covalentes.

Formule de Lewis des molécules

Une formule de Lewis d'une molécule est une représentation de celle-ci où l'on fait apparaître les électrons de valence de chaque atome.

COURS

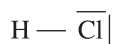
INTERROS

CORRIGÉS

Exemple : on considère la molécule de chlorure d'hydrogène HCl. Il manque un électron à l'atome d'hydrogène pour acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit (l'hélium), tandis qu'il en manque également un à l'atome de chlore pour acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit (l'argon).

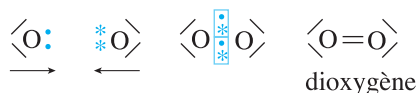
$\text{H} \begin{array}{|c|} \hline * \\ \hline \cdot \\ \hline \end{array} \overline{\text{Cl}} |$
 liaison covalente

Enfin, on allège ce dessin, en adoptant la convention de représenter une liaison covalente par un trait :



Notons que l'atome de chlore possède sept électrons sur sa couche de valence, et qu'un seul participe à un doublet liant. Les six autres se retrouvent dans les trois doublets non-liant indiqués ci-dessus.

Exemple : on considère la molécule de dioxygène. Il manque deux électrons à chaque atome d'oxygène pour acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit dans le tableau périodique (à savoir le néon). Chaque atome d'oxygène doit donc gagner deux électrons pour devenir chimiquement stable. Ceci se fait de la manière représentée ci-après :



La liaison qui se forme entre les deux atomes d'oxygène correspond à la mise en commun de *quatre* électrons. Ceux-ci doivent donc être représentés par *deux* tirets ou doublets. La liaison résultante est donc qualifiée de *liaison double*.

Notons que l'atome d'oxygène possède six électrons sur sa couche de valence, et que deux seulement participent à un doublet liant. Les quatre autres se retrouvent dans les deux doublets non-liant pour chaque atome, comme on le voit ci-dessus.

STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

5 Énergie de liaison

« Casser » une molécule de manière à la fragmenter en ses atomes individuels requiert de l'énergie. Cette énergie est appelée énergie de liaison de la molécule.

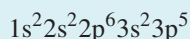
Dans le cas particulier d'une molécule diatomique (à deux atomes) comme celles que nous avons vu ci-dessus, fragmenter la molécule consiste à rompre l'unique liaison entre les deux atomes. Dans ce cas, l'énergie de liaison est l'énergie qu'il faut dépenser pour rompre cette liaison.

Plus l'énergie de liaison est grande, plus la liaison est solide.

➡ Solution de l'exercice type

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. Sa configuration électronique est obtenue en remplissant ses sous-couches dans l'ordre, et en respectant un maximum de deux électrons pour les sous-couches s et six électrons pour les sous-couches p. Nous obtenons :



De la même manière, on trouve les configurations électroniques des atomes suivants :

(b) Magnésium : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$

(c) Lithium : $1s^2 2s^1$

(d) Fluor : $1s^2 2s^2 2p^5$

- 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 : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$.
- (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 : $1s^2 2s^2 2p^6$.
- (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 : $1s^2$.
- (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 : $1s^2 2s^2 2p^6$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Lycée Pablo Picasso, Fontenay

- 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).

Voir énoncé page 233

STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 242

- 1 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
- 2 L'ion obtenu à la question précédente est
☐ a un anion
☐ b un cation
- 3 Le sodium Na, de numéro atomique $Z = 11$, a pour structure électronique $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. Il va donc former l'ion :
☐ a Na^{2+} ☐ b Na^+ ☐ c Na^{2-} ☐ d Na^-

2 Chercher les intrus

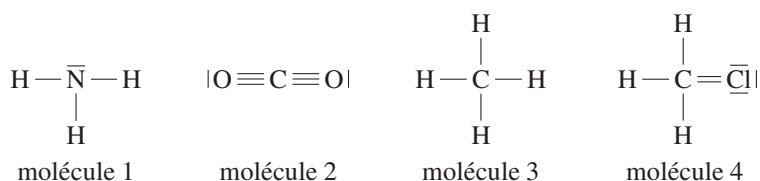


5 min

Corrigé
p. 242

Lycée Hélène Boucher, Toulouse

Identifier parmi les formules de Lewis ci-dessous celles qui sont incorrectes.



3 Formules de molécules

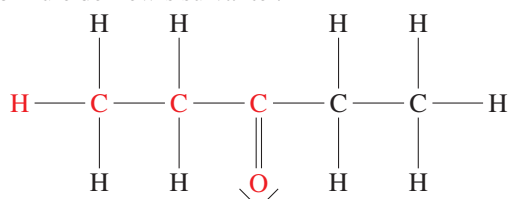


5 min

Corrigé
p. 242

Lycée Saint-John Perse, Pau

On donne la formule de Lewis suivante :



- 1 Pour chacun des atomes représentés en rouge, indiquer le nombre total d'électrons sur la couche de valence. Spécifier combien appartiennent à des doublets liants et combien appartiennent à des doublets non-liants.
- 2 Cette molécule peut-elle exister ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Formules développées



20 min

Corrigé
p. 243

Lycée Jean Bosco, Guines

Donner les formules de Lewis des molécules suivantes :



On établira au préalable les configurations électroniques de tous les atomes présents dans ces molécules.

5 Formules développées



20 min

Corrigé
p. 243

Lycée Pasteur, Neuilly

1 Donner la configuration électronique de l'atome de silicium et de l'atome de fluor.

2 En déduire la formule de Lewis de la molécule de tétrafluorure de silicium, sachant que la molécule possède 4 liaisons covalentes simples.

Données :

Le numéro atomique du fluor est $Z = 9$ et celui du silicium est $Z = 14$.

6 Les bienfaits du potassium



25 min

Corrigé
p. 244

Lycée Condorcet, Paris

Pour cet exercice, il sera possible de se référer au tableau périodique page 335.

Le potassium dans le corps humain

Le potassium est un minéral très répandu. Le corps humain contient en moyenne 170 grammes de potassium dont la plus grande partie est située dans les cellules des muscles. Le potassium intervient donc quasiment partout dans le corps humain en même temps que le chlorure de sodium (sel). L'alimentation en est très riche et elle apporte très largement ce qui nous est nécessaire.

Rôle du potassium dans l'organisme

Le potassium dirige l'hydratation des cellules de l'organisme. Le potassium se trouve essentiellement dans l'eau intracellulaire, celle qui est à l'intérieur des cellules tandis que le sodium se trouve surtout dans l'eau extracellulaire, celle où baignent toutes les cellules du corps. Dans cette eau, tous les éléments nutritifs sont dissous : c'est là où se font toutes les réactions chimiques. Les échanges d'eau entre les deux milieux, intracellulaire et extracellulaire, sont régis par le potassium et le chlorure de sodium.

STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

Du potassium dans les bananes

Calcium	Cuivre	Fer	Magnésium	Phosphore	Potassium	Sodium	Zinc
Ca	Cu	Fe	Mg	P	K	Na	Zn
5 mg	0,078 mg	0,26 mg	27 mg	22 mg	358 mg	1 mg	0,015 mg

Tableau 13.1 – Minéraux présents dans 100 g de banane

Dose journalière admissible (DJA)

Pour l'homme, la dose maximale recommandée de potassium est de 60 mg/kg/24h.

- 1** Le document fait référence à trois éléments : le potassium, le sodium et le chlore.
Qu'est-ce qui caractérise un élément en chimie ?
- 2** L'atome de chlore possède 17 électrons.
 - (a) Justifier cette affirmation.
 - (b) Donner la configuration électronique de l'atome de chlore.
 - (c) Justifier que l'ion stable du chlore est l'ion chlorure Cl^- en énonçant une règle.
- 3** Le numéro atomique du sodium est $Z = 11$.
 - (a) Donner la représentation électronique du sodium.
 - (b) À quelle famille chimique appartient-il ?
 - (c) Quel ion peut-il former ? Justifier.
 - (d) En déduire, en le justifiant, l'ion formé par l'élément potassium.
- 4** À l'aide du tableau périodique, retrouver les ions formés par les éléments phosphores et calcium.
- 5** Déterminer le nombre moyen d'atomes de potassium présents dans le corps humain ($A = 39$ pour le potassium).
- 6** Une banane a une masse moyenne de 150 g.
À l'aide des documents, retrouver combien de bananes un homme de 70 kg peut manger par jour sans dépasser la dose maximale recommandée de potassium.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 **QCM** Testez vos connaissances

Énoncé
p. 239

- 1 Réponse **a**.
- 2 Réponse **b**.
- 3 Réponse **b**.

2 Chercher les intrus

Énoncé
p. 239

Lycée Hélène Boucher, Toulouse

- 1 La formule de Lewis de la molécule 1 est correcte. Il s'agit de la molécule d'ammoniac. Chaque atome d'hydrogène a deux électrons sur sa couche de valence (comme l'hélium) et l'atome d'azote en a huit (comme le néon).
- 2 La formule de Lewis de la molécule 2 est incorrecte : l'atome de carbone possède douze électrons sur sa couche de valence, ce qui ne correspond à aucun gaz noble.
- 3 La formule de Lewis de la molécule 3 est correcte (il s'agit de la molécule de méthane).
- 4 Cette formule de Lewis est incorrecte : les atomes de chlore et de carbone possèdent chacun dix électrons sur leur couche de valence, ce qui ne correspond à aucun gaz noble.

3 Formules de molécules

Énoncé
p. 239

Lycée Saint-John Perse, Pau

- 1 L'atome d'hydrogène possède deux électrons sur sa couche de valence (comme l'hélium). Ils appartiennent tous deux à un doublet liant. Les trois atomes de carbone possèdent chacun huit électrons sur leur couche de valence (comme le néon). Ils appartiennent tous à des doublets liants. Enfin, l'atome d'oxygène possède huit électrons sur sa couche de valence, à l'instar du néon. Quatre d'entre eux appartiennent à des doublets liants, et les quatre autres à des doublets non liants.
- 2 Tous les atomes étudiés à la questions précédentes ont une configuration électronique du gaz noble qui les suit dans le tableau périodique. Pour d'évidentes raisons de symétries, c'est le cas de tous les atomes d'hydrogène et des atomes de la partie droite de la formule de Lewis. Cette molécule peut donc exister.

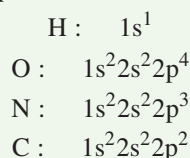
STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

4 Formules développées

Énoncé
p. 240

Lycée Jean Bosco, Guines

Les configurations électroniques des différents atomes sont :



De ces configurations électroniques nous déduisons que l'atome de carbone a besoin de quatre électrons additionnels (donc quatre liaisons) pour acquérir la configuration électronique du gaz noble qui le suit, l'azote de trois électrons additionnels et l'oxygène de deux électrons additionnels. Par ailleurs l'azote possède un doublet non-liant et l'oxygène deux.

Nous pouvons donc établir les formules de Lewis suivantes :

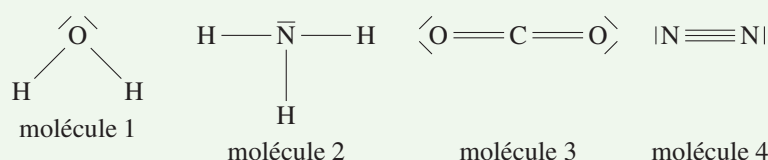


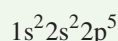
Figure 13.4 – Formules développées des molécules de l'énoncé.

5 Formules développées

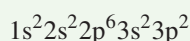
Énoncé
p. 240

Lycée Pasteur, Neuilly

- 1 La configuration électronique du fluor est :



tandis que celle du silicium est :



Il manque donc un électron au fluor pour adopter la configuration électronique du gaz noble qui le suit dans le tableau périodique, tandis qu'il en manque quatre au silicium. Le fluor doit contracter une liaison covalente et le silicium doit en contracter quatre.

- 2 Nous pouvons donc en déduire la formule de Lewis du tétrafluorure de silicium :

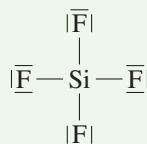


Figure 13.5 – Formule de Lewis du tétrafluorure de silicium.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Les bienfaits du potassium

Énoncé
p. 240

Lycée condorcet, Paris

- 1 Un élément est caractérisé par le nombre de protons dans son noyau.
- 2 (a) D'après la classification périodique, le Chlore est le 17ème élément. Un atome de chlore possède donc 17 protons. Comme un atome est électriquement neutre et que la charge d'un proton est l'opposé de la charge d'un électron, un atome de chlore possède également 17 électrons.
(b) D'après les règles de remplissage, la configuration électronique du chlore est $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$.
(c) Un atome à former l'ions qui lui permet d'obtenir la même configuration électronique du gaz noble le plus proche. La configuration du gaz noble le plus poche est ici $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ (l'Argon). Le chlore gagne donc un électron pour donner l'ion Cl^- .
- 3 (a) La configuration électrique du sodium est :
$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$$

Sa représentation symbolique est donc ${}_{11}^{23}\text{Na}$.
(b) Le sodium est situé sur la première colonne de la classification. Il appartient à la famille des alcalins.
(c) Il peut facilement perdre un électron pour obtenir la configuration du gaz noble le plus proche (le Néon) et forme alors un ion Na^+ .
(d) Le potassium est sur la même colonne. Il a donc des propriétés chimiques semblables et peut former l'ion K^+ .
- 4 Pour acquérir la configuration électronique du gaz noble le plus proche, le phosphore forme l'ion P^{3-} et le calcium forme l'ion Ca^{2+} .
- 5 Le corps humain contient $m = 170$ g de potassium. La masse d'un atome de potassium est environ égal à la masse de son noyau, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} m_{\text{atome}} &= 39 \times 1,67 \times 10^{-27} \\ &= 6,513 \times 10^{-26} \text{ kg} \\ &= 6,513 \times 10^{-23} \text{ g.} \end{aligned}$$

On en déduit le nombre N d'atomes car $m = N \times m_{\text{atome}}$ donc :

$$N = \frac{m}{m_{\text{atome}}} = 2,6 \times 10^{24} \text{ atomes}$$

(en gardant un nombre de chiffres significatifs cohérent avec les données de l'énoncé).

STABILITÉ CHIMIQUE : IONS ET MOLÉCULES • CHAP. 13

- 6** D'après la DJA indiquée dans l'énoncé, un homme de 70 kg peut manger $60 \times 70 = 4\,200$ mg de potassium toutes les 24 heures. 100 grammes de banane contiennent 358 mg de potassium. La banane pèse en moyenne 150 g donc elle contient :

$$\frac{150 \times 358}{100} = 537 \text{ mg}$$

de potassium.

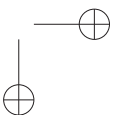
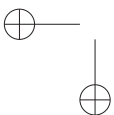
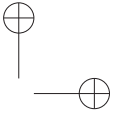
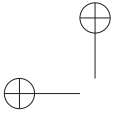
$$N_{\text{banane}} = \frac{m_{\text{journalière pour 70 kg}}}{m(k)} = \frac{4200}{537} = 7,8.$$

Donc l'homme doit consommer 7 bananes pour être sûr de ne pas dépasser la dose journalière maximale recommandée en potassium

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Quantité de matière

La mole

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Exemples

1 Introduction

Exercice type

Nouveau programme

On considère la molécule de méthane CH_4 .

- 1 Quelle est sa masse ?
- 2 Quelle quantité de matière en molécules de méthane y a-t-il dans 8,0 g de méthane ?
- 3 Quelle quantité de matière en atomes d'hydrogène y a-t-il dans 8,0 g de méthane ?

Données :

- L'atome de carbone possède 12 nucléons ;
- La masse du neutron est : $m_n = 1,67 \times 10^{-27}$ kg.

Voir corrigé page 248

Cette section nous fait aborder la notion de quantité de matière, primordiale en chimie.

2 Définitions

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* (atomes, ions, molécules, etc.) un ensemble de $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ de ces entités.

Ce nombre ($6,022\,140\,76 \times 10^{23}$) est appelé *nombre d'Avogadro* et est noté N_A et s'exprime en mol^{-1} .

Définition 2

On appelle *quantité de matière* d'un échantillon le nombre de moles présentes dans cet échantillon.

Le symbole de la mole est « mol ».

3 Exemples

La quantité de matière n en molécules d'eau d'un gramme d'eau est $n = 0,060$ mol. Cela signifie que dans un gramme d'eau il y a :

$$0,060 \times 6,022 \times 10^{23} = 3,6 \times 10^{22} \text{ molécules d'eau.}$$

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 :

$$N = n \times 6,022\,140\,76 \times 10^{23},$$

ou encore :

$$n = \frac{N}{6,022\,140\,76 \times 10^{23}}.$$

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.

🔄 Solution de l'exercice type

Nouveau programme

1 La masse de l'atome de carbone est :

$$m_C = 12m_n = 2,0 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

tandis que celle de l'atome d'hydrogène est très sensiblement égale à celle du neutron. La masse de la molécule de méthane est donc :

$$m_{\text{CH}_4} = m_c + 4 \times m_n = 2,7 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

QUANTITÉ DE MATIÈRE LA MOLE • CHAP. 14

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Nouveau programme

- 2 Évaluons le nombre N de molécules de méthane qu'il y a dans une masse $M = 8,0$ g de méthane. Ce nombre est donné par :

$$N = \frac{M}{m_{CH_4}} = \frac{8,0 \times 10^{-3}}{2,7 \times 10^{-27}} = 3,0 \times 10^{23} \text{ molécules.}$$

La quantité de matière n s'en déduit par la formule vue en cours :

$$n = \frac{N}{6,022\,140\,76 \times 10^{23}} = 0,50 \text{ mol.}$$

- 3 Nous voyons que pour chaque entité « molécule de méthane », nous avons quatre entités « atome d'hydrogène ». Nous avons donc quatre fois plus d'entités « atome d'hydrogène » que d'entités « molécule de méthane ». Nous avons donc la même relation entre les quantités de matière, par conséquent la quantité de matière n' en atomes d'hydrogène vaut :

$$n' = 4n = 2,0 \text{ mol.}$$

Voir énoncé page 247

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 252

- 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 quantité de matière sert à :
 - ☐ a peser
 - ☐ b compter
 - ☐ c classer
- 3 Dans une mole de dioxyde de carbone, il y a :
 - ☐ a une
 - ☐ b deux
 moles d'atomes d'oxygène.

2 Chloroéthane



15 min

Corrigé
p. 252

Lycée Notre-Dame des Missions, Charenton

Le chloroéthane est un anesthésique gazeux à température ambiante. Une mole de chloroéthane contient deux moles d'atomes de carbone, cinq moles d'atomes d'hydrogène et une mole de d'atome de chlore. Quelle est la formule brute du chloroéthane ?

3 Molécule de nicotine



10 min

Corrigé
p. 252

Lycée Henri IV, Paris

La molécule de nicotine a pour formule brute $C_{10}H_{14}N_2$.

- 1 Quelle est la masse d'une molécule de nicotine ?
- 2 Une cigarette contient $m = 12$ mg de nicotine. Quelle est la quantité de matière en molécules de nicotine correspondante ?

Données :

- $m_{\text{neutron}} = 1,67 \times 10^{-27}$ kg.
- Le nombre de masse de l'atome de carbone est 12.
- Le nombre de masse de l'atome d'azote est 14.
- Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

4 Atome de fer



15 min

Corrigé
p. 253

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 d'un atome de fer.

QUANTITÉ DE MATIÈRE LA MOLE • CHAP. 14

3 Combien y a-t-il d'atomes de fer dans un échantillon de fer ayant un volume de $5,0 \text{ cm}^3$?

4 Quelle est la quantité de matière correspondante ?

Données : • $m_{\text{neutron}} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
• Masse volumique du fer : $\rho = 7,8 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

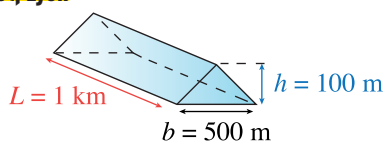
5 Grains de sable



20 min

Corrigé
p. 253

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 $0,20 \text{ mm}$. On néglige le volume interstitiel entre les grains de sable. Quelle est la quantité de matière en grains de sable dans la dune du Pyla ?

Donnée : volume d'une sphère de rayon R : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 250

- 1 Réponse **a**. En supposant qu'un grain de riz ait une masse de 0,1 g, il y aurait :

$$\frac{50}{0,1 \times 10^{-3}} = 5 \times 10^5 \text{ grains de riz dans le sac,}$$

ce qui est très largement inférieur au nombre requis pour avoir une mole (approximativement 6×10^{23}).

- 2 Réponse **b**.

- 3 Réponse **b**. La formule du dioxyde de carbone est CO_2 .

2 Chloroéthane

→ Énoncé
p. 250

Lycée Notre-Dame des Missions, Charenton

Ici, on peut s'apercevoir que la réponse est pratiquement contenue dans la question si l'on réalise que les proportions au niveau des entités sont les mêmes qu'au niveau des quantités de matière. Ainsi, on peut répéter la phrase de l'énoncé en disant « une molécule de chloroéthane contient deux atomes de carbone, cinq atomes d'hydrogène et un atome de chlore ». La formule brute du chloroéthane est donc :



3 Molécule de nicotine

→ Énoncé
p. 250

Lycée Henri IV, Paris

- 1 La masse d'une molécule de nicotine est :

$$\begin{aligned} m_N &= (12 \times 10 + 14 + 2 \times 14)m_{\text{neutron}} \\ &= 162 \times 1,67 \times 10^{-27} \\ &= 2,7 \times 10^{-25} \text{ kg.} \end{aligned}$$

- 2 Le nombre N de molécules de nicotine contenue dans une cigarette est :

$$N = \frac{m}{m_N} = \frac{12 \times 10^{-6}}{2,7 \times 10^{-25}} = 4,4 \times 10^{19} \text{ molécules}$$

La quantité de matière correspondante est :

$$n = \frac{N}{6,022 \, 140 \, 76 \times 10^{23}} = 7,3 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

QUANTITÉ DE MATIÈRE LA MOLE • CHAP. 14

4 Atome de fer

Énoncé
p. 250

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 masse.
Le nombre 26 s'appelle le numéro atomique.

- 2 La masse de l'atome de fer vaut

$$m_{\text{Fe}} = Am_n = 56 \times 1,67 \times 10^{-27} = 9,4 \times 10^{-26} \text{ kg.}$$

- 3 Il nous faut convertir $5,0 \text{ cm}^3$ en mètre cube.

Nous avons $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ donc $1 \text{ cm}^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$. Le volume de fer que l'on considère est donc $v = 5,0 \times 10^{-6} \text{ m}^3$. La masse de fer contenue dans ce volume est :

$$M = \rho v = 7,8 \times 10^3 \times 5,0 \times 10^{-6} = 3,9 \times 10^{-2} \text{ kg.}$$

Le nombre N d'atomes de fer s'en déduit par :

$$N = \frac{M}{m_{\text{Fe}}} = \frac{3,9 \times 10^{-2}}{9,4 \times 10^{-26}} = 4,1 \times 10^{23} \text{ atomes.}$$

- 4 La quantité de matière n en atomes de fer s'en déduit par la formule vue en cours :

$$n = \frac{N}{6,022\,140\,76 \times 10^{23}} = 0,68 \text{ mol.}$$

5 Grains de sable

Énoncé
p. 251

Lycée Édouard Herriot, Lyon

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 vu en cours.

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 $0,20 \text{ mm}$, son rayon vaut $0,10 \text{ mm}$ soit $0,10 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-4} \text{ m}$. On doit veiller à exprimer le volume de la dune et celui des grains de sable dans la même unité.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

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 :

$$n = \frac{N}{6,022 \times 10^{23}} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ mol.}$$

Il n'y a qu'un cent millième de mole de grains de sable dans la dune du Pyla.

Chapitre

15

Les solutions aqueuses

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définitions
3. Concentration en masse d'une solution

1 Introduction

Exercice type

Lycée Lakanal, Sceaux

À partir d'une poudre de sulfate de cuivre anhydre, on souhaite préparer 50 mL d'une solution de sulfate de cuivre dont la concentration en masse est $0,2 \text{ g.L}^{-1}$.

- 1 Quelle masse de sulfate de cuivre doit-on peser pour réaliser la solution ?
- 2 Comment s'appelle ce type de préparation où l'on obtient une solution à partir d'une poudre à laquelle on ajoute de l'eau distillée ?
- 3 Quel verrerie doit-on impérativement utiliser pour mesurer les 50 mL de la solution finale ? Donner le protocole à suivre pour obtenir la solution désirée.
- 4 On souhaite à présent obtenir, à partir de la solution préparée précédemment, 100 mL d'une solution de 10 fois moins concentrée. Donner le protocole à suivre pour obtenir la nouvelle solution en donnant le nom de ce type de préparation.

Voir corrigé page 257

Ce chapitre introduit la notion de concentration en masse 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 agitions. Les cristaux de sucre disparaissent : on dit que le sucre est dissout.

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 dissout 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).

3 Concentration en masse d'une solution

La concentration en masse d'une solution nous informe sur la quantité de soluté dissout dans cette 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 en masse C_m du soluté est donnée par :

$$C_m = \frac{m}{V}.$$

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.

Définition 3

On appelle solubilité la concentration en masse maximale d'un soluté dans un solvant donné.

ATTENTION

Il ne faut pas confondre la concentration en masse 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.

LES SOLUTIONS AQUEUSES • CHAP. 15

➔ Solution de l'exercice type

Lycée Lakanal, Sceaux

- 1 La concentration en masse souhaitée est $C_m = 0,2 \text{ g.L}^{-1}$ pour une solution de volume $V = 50 \text{ mL} = 50 \times 10^{-3} \text{ L}$.

D'après la formule de la concentration en masse, la masse de soluté à introduire est donc :

$$m = C_m \cdot V = 0,2 \times 50 \times 10^{-3} = 10^{-2} \text{ g.}$$

Remarque : on peut également résoudre le problème de la manière suivante : Si 1 litre de solution contient 0,2 g, 50 mL de solution contiendront $0,2 \times 50 \times 10^{-3} = 10^{-2} \text{ g}$ de solution. Il faut donc peser 0,01 g de sulfate de cuivre anhydre.

- 2 Ce type de préparation est une dissolution.
- 3 Pour réaliser une dissolution il faut impérativement utiliser une fiole jaugée pour mesurer le volume finale de la solution. C'est la verrerie qui permet d'obtenir la meilleure précision.
- Le protocole de la dissolution est le suivant :

- Dans une coupelle, peser 0,01 g de poudre de sulfate de cuivre anhydre grâce à une balance.
- Introduire la poudre ainsi pesée dans une fiole jaugée de 50 mL en utilisant un entonnoir à solide.
- Rincer la coupelle et l'entonnoir à l'eau distillée en plaçant l'eau de rinçage dans la fiole afin de ne pas avoir de perte de poudre sur les parois des ustensiles.
- Ajouter de l'eau distillée dans la fiole jusqu'à mi-hauteur.
- Agiter jusqu'à dissolution totale de la poudre.
- Compléter d'eau distillée en terminant avec une pipette compte-gouttes pour que le bas du ménisque arrive au niveau du trait de jauge.
- Boucher la fiole et agiter pour homogénéiser.

- 4 Il s'agit à présent d'une dissolution dont le protocole est le suivant :

- Prélever 10 mL de la solution mère grâce à une pipette jaugée de 10 mL.
- Introduire la solution ainsi prélevée dans une fiole jaugée de 100 mL.
- Ajouter de l'eau distillée jusqu'à mi-hauteur et agiter pour homogénéiser la solution.
- Compléter d'eau distillée en terminant avec une pipette compte-gouttes pour que le bas du ménisque arrive au niveau du trait de jauge.
- Boucher la fiole et agiter pour homogénéiser.

Notons que les protocoles pour réaliser une dilution et une dissolution sont à connaître.

Voir énoncé page 255

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 260

- 1 On dispose d'une solution aqueuse de concentration en masse 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 en masse 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. 260

Lycée Galilée, Vienne

On dissout 5,0 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 masse en saccharose de la solution obtenue ?

3 Analyse de sang



5 min

Corrigé
p. 260

Lycée Fénélon, Paris

On considère l'analyse de sang dont un extrait est donné ci-dessous :

Bilan lipidique

cholestérol $1,91 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

Quelle est la masse totale de cholestérol dans le sang de la personne analysée, sachant que celle-ci a un volume de sang total $V = 5,2 \text{ L}$.

4 Boisson light



5 min

Corrigé
p. 260

Lycée Carnot, Cannes

Une canette de 33 cL d'une boisson *light* contient 80 mg d'aspartame, un édulcorant artificiel. Déterminer la concentration en masse de l'aspartame dans cette boisson.

LES SOLUTIONS AQUEUSES • CHAP. 15

5 Solution de glucose



10 min

Corrigé
p. 261

Lycée du Parc, Lyon

On dispose de 150 mL d'une solution de glucose $C_6H_{12}O_6$ de concentration en masse $c = 3,6 \text{ g.L}^{-1}$.

- 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 en masse du soluté ?

6 Perfusion de glucose



15 min

Corrigé
p. 261

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 en masse d'une solution de glucose à 5,0 % ?
- 2 Quelle masse de glucose doit-on mesurer pour préparer, par dissolution dans de l'eau pure, 50,0 mL de solution de glucose à 50 % ?

7 Mélange de deux solutions



15 min

Corrigé
p. 261

Lycée Charles Péguy, Gorges

On considère un volume V_1 d'une solution aqueuse d'une espèce moléculaire de concentration en masse C_1 , et un volume V_2 d'une solution aqueuse de la même espèce moléculaire de concentration en masse C_2 ($C_2 > C_1$). On mélange entre elles les deux solutions.

- 1 Quelle est la masse de l'espèce moléculaire dans la première solution ? Dans la deuxième solution ? En déduire sa masse dans le mélange.
- 2 En déduire la concentration en masse C de la solution obtenue en fonction de C_1 , C_2 , V_1 et V_2 . (on admettra que le volume V du mélange est donné par $V = V_1 + V_2$).
- 3 Montrer que la concentration C de la solution obtenue est comprise entre C_1 et C_2 .
- 4 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).

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

→ Énoncé
p. 258

- 1 Réponse **b**. On a la même masse de soluté dans un volume deux fois plus grand de solvant.
- 2 Réponse **c**. La solution est saturée, donc sa concentration en saccharose est maximale et ne peut pas augmenter.
- 3 Réponse **a**. Si on appelle V_1 et V_2 les volumes des solutions initiales, et c leur concentration en masse, 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. 258

Lycée Galilée, Vienne

La concentration en masse est donnée par :

$$c = \frac{5,0}{50 \times 10^{-3}} = 1,0 \times 10^2 \text{ g.L}^{-1}$$

MÉTHODE

Il faut veiller à exprimer la masse en gramme et le volume en litre pour obtenir la concentration en masse dans l'unité usuelle g.L^{-1} .

3 Analyse de sang

→ Énoncé
p. 258

Lycée Fénélon, Paris

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 en masse 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.

4 Boisson light

→ Énoncé
p. 258

Lycée Carnot, Cannes

La concentration en masse C_m s'obtient en divisant la masse $m = 80 \text{ mg}$ par le volume $V = 33 \text{ mL}$:

$$C_m = \frac{m}{V} = \frac{80 \times 10^{-3}}{33 \times 10^{-3}} = 2,4 \text{ g.L}^{-1}.$$

LES SOLUTIONS AQUEUSES • CHAP. 15

5 Solution de glucose

Énoncé
p. 259

Lycée du Parc, Lyon

- 1 La concentration en masse est

$$C = \frac{m}{V}$$

où m est la masse de glucose dans la solution et V est le volume de celle-ci. Nous avons donc :

$$m = CV.$$

L'application numérique donne :

$$m = 3,6 \times 0,15 = 0,54 \text{ g}$$

Il a fallu dissoudre 0,54 g de glucose pour fabriquer cette solution.

- 2 Le nouveau volume de la solution est $V' = 150 + 350 = 500 \text{ mL}$. La concentration en masse C' du glucose y est donc :

$$C' = \frac{m}{V'} = \frac{0,54}{0,500} = 1,1 \text{ g.L}^{-1}.$$

6 Perfusion de glucose

Énoncé
p. 259

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 en masse d'une solution de glucose à 5 % est $C_m = 50 \text{ g.L}^{-1}$.

- 2 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.

7 Mélange de deux solutions

Énoncé
p. 259

Lycée Charles Péguy, Gorges

- 1 La masse de soluté dans la première solution est $m_1 = C_1 V_1$. La masse de soluté dans la deuxième solution est $m_2 = C_2 V_2$. La masse de soluté dans le mélange est donc $m = C_1 V_1 + C_2 V_2$.

- 2 La concentration en masse du soluté dans le mélange est donc :

$$C = \frac{m}{V_1 + V_2} = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{V_1 + V_2}.$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

CORRIGÉS

- 3 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 :

$$C_1 < C < C_2.$$

Ce résultat est assez intuitif et nous dit que la concentration du mélange est intermédiaire entre les concentrations des deux solutions initiales.

- 4 La teinte d'une solution de diiode 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 : $C < C_2$.

Chapitre 16

Les transformations physiques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Rappel : les trois états de la matière
3. Les changements d'état
4. Transferts énergétiques

1 Introduction

Exercice type

Nouveau programme

On souhaite faire fondre une masse de fer $m = 57$ kg.

- 1 Comment s'appelle ce changement d'état ? Écrire la transformation correspondante de manière symbolique.
- 2 À quelle température doit-on porter la masse de fer pour que débute ce changement d'état ?
- 3 Entre le moment où ce changement d'état débute et le moment où le fer est entièrement liquide, quelle quantité d'énergie E a-t-on fourni au fer ? Donner le résultat en joule puis en kilowattheure.
- 4 Au cours de cette transformation, comment évolue la température du mélange de fer solide et de fer liquide ?

Données :

Température de fusion du fer : $1535\text{ }^{\circ}\text{C}$

Température de vaporisation du fer : $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$

Énergie massique de fusion du fer : $2,07 \times 10^5\text{ J.kg}^{-1}$

Énergie massique de vaporisation du fer : $6,36 \times 10^6\text{ J.kg}^{-1}$

Voir corrigé page 267

Cet exercice aborde la notion de transformation physique et les transferts d'énergie associés.

2 Rappel : les trois états de la matière

Tout corps pur peut exister sous trois états différents : solide, liquide et gazeux. Lorsqu'on souhaite spécifier l'état dans lequel il se trouve à côté de sa formule brute, on écrit une lettre entre parenthèses à sa droite, ou un exposant sans parenthèse. Ainsi, l'eau sous forme liquide peut se symboliser par $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ ou $\text{H}_2\text{O}^{\text{l}}$. On utilise les lettres s et g pour symboliser respectivement l'état solide et l'état gazeux.

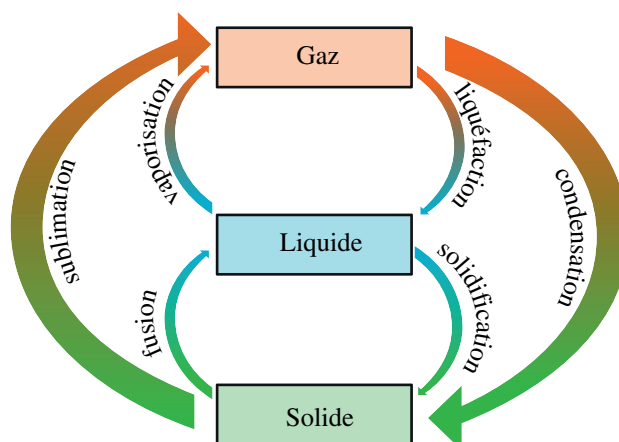
Au niveau microscopique, les atomes ou molécules constituant un solide sont dans des positions figées les uns par rapport aux autres. Il existe entre elles des liaisons (dont le type dépend du solide considéré) qui leur imposent de maintenir cette configuration figée.

Dans les liquides, les atomes ou molécules peuvent « glisser » les uns sur les autres : leur position par rapport à l'ensemble des autres n'est plus imposée. On dit que le système est fluide. Toutefois, ils restent proches les uns des autres, comme dans un solide. Leur configuration reste « compacte », ce qui explique que les liquides aient des masses volumiques comparables à celles des solides. On peut dire qu'un système à l'état liquide est plus « désordonné » qu'à l'état solide.

Enfin, dans les gaz, la vitesse d'agitation des atomes ou molécules est telle qu'ils occupent tout l'espace disponible et se rencontrent rarement entre eux. La masse volumique des gaz est considérablement plus faible que celle des liquides ou solides. À l'instar des liquides, les gaz sont aussi des fluides. On peut également remarquer qu'un système à l'état gazeux est encore plus « désordonné » qu'à l'état liquide.

3 Les changements d'état

On parle de changement d'état lorsqu'un système, initialement dans l'un des trois états mentionnés au paragraphe précédent, change d'état. Il y a six possibilités au total. Chaque changement d'état porte un nom, que l'on doit retenir. Ils sont résumés sur la figure ci-après.



LES TRANSFORMATIONS PHYSIQUES • CHAP. 16

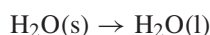
Les changements d'état ont lieu, pour une pression extérieure donnée, à des températures bien précises qui dépendent de la nature du corps pur et de la transformation considérée. Pendant toute la durée de la transformation, la température reste constante, et les deux phases du corps coexistent. Ainsi, pendant la solidification de l'eau pure à pression ambiante, on a un mélange d'eau et de glace, et la température du milieu reste constante et égale à 0 °C.

Remarques

- Nous mentionnerons dans un chapitre ultérieur, sur les transformations nucléaires, la notion de réaction de fusion. Ceci n'a *absolument rien à voir* avec le changement d'état appelé fusion (solide vers liquide) dont il est question ici. Le contexte ne permet en général pas de doute entre les deux acceptions.
- Le mot fusion et le verbe associé « fondre » sont souvent source de confusion, dans le langage courant, avec un autre phénomène qui n'est pas un changement d'état : la dissolution. On dit fréquemment, par exemple, que l'on « fait fondre du sucre » dans du café. Cette expression est *incorrecte* : on dissout le sucre dans le café. Notons qu'il est tout-à-fait possible de faire fondre (c'est-à-dire réaliser la fusion) du sucre (saccharose) en le portant à la température de 186 °C, mais ce n'est probablement pas à ce phénomène que font allusion la plupart des personnes qui utilisent l'expression « faire fondre du sucre » ...

3.1 Écriture symbolique

Pour écrire un changement d'état de manière symbolique, on indique la formule brute du corps pur et son état physique initial, puis une flèche vers la droite, et sa formule brute et son état physique final. Ainsi, la fusion de l'eau s'écrit symboliquement de la manière suivante :



3.2 Interprétation microscopique

Les changements d'état peuvent s'interpréter à l'échelle microscopique en terme d'agitation des atomes ou molécules. Dans un solide, ceux-ci vibrent autour de leur position moyenne (laquelle est imposée, ainsi que nous l'avons vu). Lorsqu'on communique de l'énergie au solide, l'amplitude de ces vibrations augmente, jusqu'au point où les liaisons entre atomes ou molécules sont rompues : ils peuvent alors circuler librement et le système passe à l'état liquide.

Si on continue d'apporter de l'énergie au système, on arrive à un point où la vitesse d'agitation des atomes ou molécules du corps leur permet de se séparer les uns des autres et d'explorer tout le volume qui leur est permis : c'est le passage à l'état gazeux.

On voit ainsi que communiquer de l'énergie au système le fait passer dans des états de plus en plus désordonnés.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

4 Transferts énergétiques

Nous avons vu au paragraphe précédent que pour passer vers des états plus désordonnés, il faut *communiquer* de l'énergie au système. Les changements d'état associés sont donc des transformations endothermiques : le transfert d'énergie se fait de l'extérieur vers le système.

À RETENIR

La fusion, vaporisation et sublimation sont des transformations endothermiques.

En revanche, pour passer vers des états plus ordonnés, il faut extraire de l'énergie du système (à l'échelle microscopique, il faut faire baisser les vitesses d'agitation des atomes ou molécules). Lors des changements d'état associés, de l'énergie est donc transférée du système vers l'extérieur : ce sont des transformations exothermiques.

À RETENIR

La solidification, liquéfaction et condensation sont des transformations exothermiques.

La quantité d'énergie à fournir à un système pour le faire changer d'état est proportionnelle à sa masse. Elle dépend de la nature du corps et du type de transformation. L'énergie à fournir par unité de masse du corps s'exprime, dans les unités du Système International, en J.kg^{-1} . Elle porte le nom d'énergie massique de changement d'état et est notée avec un L majuscule.

À RETENIR

La quantité d'énergie à fournir à un système pour le faire changer d'état est égale à la quantité d'énergie qu'il libère quand il revient à son état initial.

L'énergie E fournie au système, ou reçue par celui-ci (selon que la transformation est endothermique ou exothermique) lors d'un changement d'état est $E = m \times L$, où m est la masse du système.

Exemples

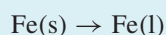
- Ainsi, pour faire fondre 1,0 kg de glace, il faut lui communiquer une énergie de $3,3 \times 10^5$ J. Lorsque de l'eau liquide à 0 °C gèle, elle libère une quantité d'énergie égale à $3,3 \times 10^5$ J.
- De cet exemple nous déduisons que l'énergie massique de fusion de l'eau est $L_f = 3,3 \times 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$. La lettre f en indice indique que l'on se réfère à la fusion.

LES TRANSFORMATIONS PHYSIQUES • CHAP. 16

➔ Solution de l'exercice type

Nouveau programme

- 1** Ce changement d'état s'appelle la fusion. La transformation correspondante s'écrit symboliquement de la manière suivante :



- 2** Ce changement d'état a lieu à la température de fusion du fer, soit 1 535 °C. C'est la température à laquelle on doit porter le fer pour que débute le changement d'état.

- 3** L'énergie à fournir au système est :

$$E = mL_f = 57 \times 2,07 \times 10^5 = 1,2 \times 10^7 \text{ J}$$

Par ailleurs :

$$1 \text{ kWh} = 3600 \times 10^3 = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

donc

$$E = \frac{1,2 \times 10^7}{3,6 \times 10^6} = 3,3 \text{ kWh}$$

Remarques

- Nous gardons deux chiffres significatifs dans les résultats puisque c'est la précision avec laquelle est donnée la masse du fer.
- Les données de l'énoncé relatives à la vaporisation du fer étaient inutiles.

Voir énoncé page 263

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

10 min

Corrigé
p. 270

- 1 Lors du changement d'état d'un corps pur, sa formule brute change.
☐ a) vrai
☐ b) faux
- 2 La vaporisation est une transformation :
☐ a) endothermique
☐ b) exothermique
- 3 Lorsqu'on introduit du sel dans de l'eau pure, la transformation correspondante est :
☐ a) une dissolution
☐ b) une fusion
- 4 Un corps passe d'un état donné A (solide, liquide ou gazeux) vers un autre état B. Si ce changement d'état est exothermique, alors le changement d'état $B \rightarrow A$ est :
☐ a) également exothermique
☐ b) endothermique
☐ c) on ne peut pas conclure

2 Vaporisation de l'eau

★★

15 min

Corrigé
p. 270

Nouveau Programme

On oublie sur le feu une casserole contenant un volume $v = 5,4 \times 10^2$ mL d'eau en ébullition. La puissance du brûleur sous la casserole est de 3,5 kW. On suppose que toute l'énergie libérée par le brûleur est utilisée pour vaporiser l'eau contenue dans la casserole.

- 1 La vaporisation est-elle une transformation exothermique ou endothermique ?
- 2 Représenter symboliquement la transformation physique qui a lieu.
- 3 Au bout de combien de temps toute l'eau initialement contenue dans la casserole s'est-elle vaporisée ?
- 4 Que peut-il se passer une fois que toute l'eau s'est vaporisée ?

Données :

Énergie massique de vaporisation de l'eau : $L_v = 2,26 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$.

LES TRANSFORMATIONS PHYSIQUES • CHAP. 16

3 Dégazage d'une comète



15 min

Corrigé
p. 271

Nouveau Programme

Les comètes sont des petits corps glacés du système solaire qui ont une orbite très allongée. Elles sont la plupart du temps loin du Soleil, et la glace dont elles sont constituées ne change alors pas d'état. Toutefois, périodiquement, elles passent près du Soleil et une partie de la glace qui les recouvre passe directement à l'état gazeux. Le gaz ainsi libéré dans l'espace donne lieu à leur magnifique « chevelure », facilement observable, caractéristique de l'image des comètes.

- 1 Comment s'appelle le changement d'état qui a lieu lorsqu'elles passent à proximité du Soleil ?
- 2 Ce changement d'état est-il endothermique ou exothermique ?
- 3 Nous considérons une comète de forme sphérique et de rayon $r = 1,2$ km. Nous faisons l'hypothèse que la glace dont elle est constituée est exclusivement de la glace d'eau. On peut considérer que durant le passage à proximité du Soleil chaque mètre carré de la surface de la comète reçoit de celui-ci une énergie égale à $1,6 \times 10^9$ J. On suppose que toute l'énergie reçue du Soleil est utilisée pour donner lieu au changement d'état de la glace.
Quelle est la masse totale de vapeur d'eau libérée dans l'espace durant le passage au voisinage du Soleil ?
- 4 Sachant que la comète contient une masse de glace $m_c = 1,5 \times 10^{13}$ kg, combien de passages au voisinage du soleil peut-elle effectuer avant de disparaître ? On supposera qu'elle perd la même quantité de vapeur d'eau à chaque passage au voisinage du soleil.

Données :

- Énergie massique pour le changement de l'état solide à l'état gazeux de l'eau : $L = 2,8 \times 10^6$ J.kg⁻¹.
- Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4\pi r^2$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 Testez vos connaissances

 Énoncé
p. 268

- 1 Réponse **b**.
- 2 Réponse **a**.
- 3 Réponse **a**.
- 4 Réponse **b**.

2 Vaporisation de l'eau

 Énoncé
p. 268

Nouveau Programme

- 1 La vaporisation est une transformation endothermique.
- 2 Cette transformation s'écrit :
$$\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O(g)}$$
- 3 Soit m la masse d'eau contenue dans la casserole. Nous avons :

$$m = \rho v,$$

où $\rho = 1,0 \text{ kg.L}^{-1}$ est la masse volumique de l'eau (à connaître par cœur). Nous avons donc :

$$m = 5,4 \times 10^2 \times 10^{-3} \times 1,0 = 0,54 \text{ kg.}$$

MÉTHODE

Il faut multiplier la valeur du volume donnée dans l'énoncé par 10^{-3} pour l'exprimer en litre.

Pour vaporiser cette masse d'eau, il faut lui donner une énergie

$$E = mL_v = 0,54 \times 2,26 \times 10^6 = 1,2 \times 10^6 \text{ J.}$$

Le temps nécessaire pour donner cette énergie à l'eau est :

$$t = \frac{E}{P},$$

où P est la puissance du brûleur. L'application numérique donne :

$$t = \frac{1,2 \times 10^6}{3,5 \times 10^3} = 3,4 \times 10^2 \text{ s,}$$

soit un peu plus de cinq minutes. En pratique toute l'énergie libérée par le brûleur n'est pas utilisée pour vaporiser l'eau, donc le temps requis est en réalité plus long que cette estimation.

- 4 Tant qu'il reste de l'eau dans la casserole, sa température est nécessairement 100°C , ce qui limite la température des parois de la casserole. Une fois que toute l'eau a disparu de la casserole, cette limitation n'existe plus et l'énergie libérée par le brûleur sert alors à élever la température du métal constituant la casserole. Celle-ci peut atteindre des températures extrêmement élevées, et il y a alors un risque d'incendie.

LES TRANSFORMATIONS PHYSIQUES • CHAP. 16

3 Dégazage d'une comète

Énoncé
p. 269

Nouveau Programme

- 1 Le passage de l'état solide à l'état gazeux s'appelle la sublimation.
- 2 Il s'agit d'une transformation endothermique.
- 3 Calculons l'énergie reçue par la comète au cours de son passage au voisinage du Soleil. Sa surface est :

$$S = 4\pi r^2 = 4 \times 3,14 \times (1,2 \times 10^3)^2 = 1,8 \times 10^7 \text{ m}^2.$$

L'énergie reçue par la comète sur l'ensemble de sa surface est :

$$E = 1,8 \times 10^7 \times 1,6 \times 10^9 = 2,9 \times 10^{16} \text{ J}.$$

Nous avons par ailleurs $E = m \times L$, où m est la masse de glace sublimée, par conséquent :

$$m = \frac{E}{L} = \frac{2,9 \times 10^{16}}{2,8 \times 10^6} = 1,0 \times 10^{10} \text{ kg}.$$

- 4 La comète peut effectuer un nombre N de passages, avec :

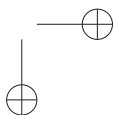
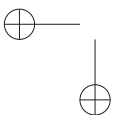
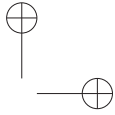
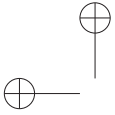
$$N = \frac{m_c}{m} = \frac{1,5 \times 10^{13}}{1,0 \times 10^{10}} = 1,5 \times 10^3.$$

La comète peut effectuer environ 1500 passages au voisinage du Soleil.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre 17

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
5. Considérations énergétiques

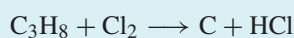
 Retrouvez ce cours en vidéo avec 

1 Introduction

Exercice type

Lycée Pierre Corneille, Rouen

Équilibrer l'équation-bilan suivante :



Voir corrigé page 277

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. 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.

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.

Les espèces chimiques qui sont présentes dans le système mais qui ne réagissent pas sont appelées *espèces spectatrices*.

On ne les indique pas dans l'équation bilan.

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 :

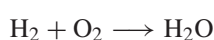
réactifs $\longrightarrow$ produits

LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

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.

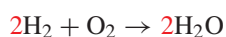
4 Lois de conservation au cours d'une transformation chimique

➡ 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 *nombre 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.

COURS

INTERROS

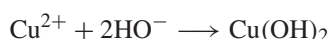
CORRIGÉS

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

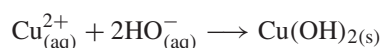
La charge électrique se conserve au cours d'une transformation chimique.

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.

LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

5 Considérations énergétiques

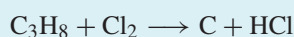
Le transfert d'énergie entre le système chimique et l'extérieur, au cours de la réaction, peut se faire :

- de l'extérieur vers le système. Dans ce cas la réaction est dite endothermique (elle consomme de la « chaleur »).
- du système vers l'extérieur. Dans ce cas la réaction est dite exothermique (elle libère de la « chaleur »).

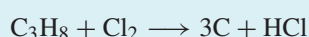
➔ Solution de l'exercice type

Lycée Pierre Corneille, Rouen

Partons de l'équation-bilan non équilibrée :



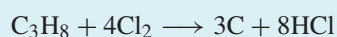
Nous voyons que nous avons 3 moles d'élément carbone C à gauche et une mole à droite. Pour équilibrer la quantité d'élément carbone, nous mettons un coefficient 3 au carbone du côté des produits :



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 273

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 281

- 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. 281

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. 281

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. 282

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.

LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

- 4 Y a-t-il des espèces chimiques spectatrices ? Justifier.
- 5 Écrire et équilibrer l'équation de la réaction correspondante.

5 Équations de combustion



5 min

Corrigé
p. 282

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).

On rappelle qu'une combustion complète a lieu avec du dioxygène, et forme du dioxyde de carbone et de l'eau.

- 1 du propane C_3H_8 .
- 2 du propène C_3H_6 .

6 Équilibrer des équations-bilan



10 min

Corrigé
p. 283

Lycée Pierre Termier, Grenoble

Équilibrer les équations-bilan des réactions suivantes :

- 1 $CH_4 + O_2 \longrightarrow H_2O + CO_2$
- 2 $Ni + O_2 \longrightarrow NiO$
- 3 $Fe + Cl_2 \longrightarrow FeCl_3$
- 4 $PbO + C \longrightarrow Pb + CO_2$
- 5 $N_2H_4 + O_2 \longrightarrow N_2 + H_2O$
- 6 $Cu_2S + O_2 \longrightarrow Cu_2O + SO_2$
- 7 $Cu + O_2 \longrightarrow Cu_2O$
- 8 $C_3H_8 + Cl_2 \longrightarrow C + HCl$

7 Stœchiométrie



10 min

Corrigé
p. 283

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

Ajuster la stœchiométrie des équations chimiques suivantes :

- 1 $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- 2 $C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- 3 $Al + O_2 \rightarrow Al_2O_3$
- 4 $FeCl_3 + MgO \rightarrow Fe_2O_3 + MgCl_2$
- 5 $Pb^{2+} + I^- \rightarrow PbI_4^{2-}$
- 6 $C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_2H_6O + CO_2$
- 7 $Cu^{2+} + HO^- \rightarrow Cu(OH)_2$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

8 Synthèse d'urée



10 min

Corrigé
p. 284

Lycée Français, Le Caire

L'urée est un corps pur composé de formule brute CON_2H_4 . Elle est produite par réaction entre deux gaz : l'ammoniac NH_3 et le dioxyde de carbone CO_2 .

- 1 Écrire l'équation-bilan de la réaction sachant qu'il se forme également de l'eau.
- 2 On fait réagir 3 mol d'ammoniac et 2 mol de dioxyde de carbone. Quel est le réactif limitant ? Quelle est la quantité de matière d'urée obtenue ?

9 Équilibrer des équations



15 min

Corrigé
p. 284

Lycée Auguste Renoir, Limoges

Équilibrer les équations des réactions chimiques suivantes :

- 1 $\text{Zn}_{(s)} + \text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{ZnCl}_{2(aq)} + \text{H}_{2(g)}$
- 2 $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 3 $\text{FeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_2$
- 4 $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- 5 $\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{S}_{(s)} + \text{H}_2\text{O}$
- 6 $\text{Al}_{(s)} + \text{HCl}_{(aq)} \rightarrow \text{AlCl}_{3(aq)} + \text{H}_{2(g)}$
- 7 $\text{CaCl}_2 + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{AgCl} + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

10 Équilibrer les équations



25 min

Corrigé
p. 287

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 $\text{Na}^+_{(aq)} + \text{HO}^-_{(aq)}$ dans une solution de sulfate de cuivre (II) de formule $\text{Cu}^{2+}_{(aq)} + \text{SO}_4^{2-}_{(aq)}$, il se forme un précipité d'hydroxyde de cuivre (II) $\text{Cu}(\text{OH})_2$.
- 3 Les ions plomb (II) $\text{Pb}^{2+}_{(aq)}$ réagissent avec les ions iodure $\text{I}^-_{(aq)}$ 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 .

LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 278

- 1 L'équation-bilan $\square$ 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 $\square$ 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... Notons que l'usage est généralement d'écrire l'équation avec des nombres stœchiométriques entiers les plus petits possibles.

2 Équilibrer des équations-bilan

Énoncé
p. 278

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 :

- 1 $2CuO + C \longrightarrow 2Cu + CO_2$
- 2 $2Cu + O_2 \longrightarrow 2CuO$

3 Équations-bilan

Énoncé
p. 278

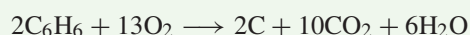
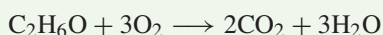
Lycée Gabriel Fauré, Paris

MÉTHODE

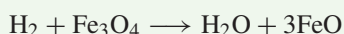
Pour résoudre ce genre d'exercice, on commence par ajuster les coefficients stœchiométriques des éléments représentés une seule fois dans les réactifs et une seule fois dans les produits (par exemple le carbone et l'hydrogène pour la première équation-bilan). Ensuite on ajuste les coefficients des autres 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 en effet 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).



COURS

INTERROS

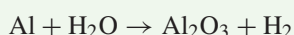
CORRIGÉS

4 Synthèse d'alumine

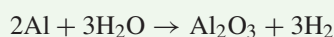
Énoncé
p. 278

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 produits, 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. 279

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 :
$$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$$
- 2 Combustion complète du propène :
$$2\text{C}_3\text{H}_6 + 9\text{O}_2 \longrightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$$

LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

6 Équilibrer des équations-bilan

Énoncé
p. 279

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.

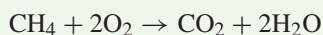
- 1 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 2 $2\text{Ni} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{NiO}$
- 3 $2\text{Fe} + 3\text{Cl}_2 \longrightarrow 2\text{FeCl}_3$
- 4 $2\text{PbO} + \text{C} \longrightarrow 2\text{Pb} + \text{CO}_2$
- 5 $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- 6 $2\text{Cu}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$
- 7 $4\text{Cu} + \text{O}_2 \longrightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$
- 8 $\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{Cl}_2 \longrightarrow 3\text{C} + 8\text{HCl}$

7 Stœchiométrie

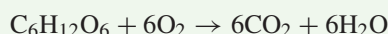
Énoncé
p. 279

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

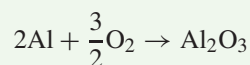
- 1 Le nombre d'atomes de carbone est identique pour les réactifs et les produits. On équilibre les atomes d'hydrogène, puis on termine par les atomes d'oxygène. On obtient :



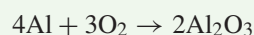
- 2 On équilibre tout d'abord les atomes de carbone et d'hydrogène, puis on termine par les atomes d'oxygène. On obtient :



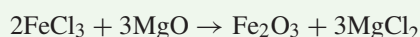
- 3 On équilibre indépendamment les atomes d'aluminium et ceux d'oxygène. On obtient :



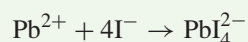
ou encore, si l'on veut se limiter à des coefficients entiers :



- 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 :

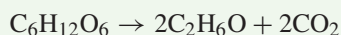


COURS

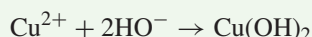
INTERROS

CORRIGÉS

- 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 :

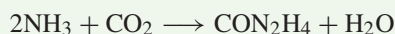


8 Synthèse d'urée

➔ Énoncé
p. 280

Lycée Français, Le Caire

- 1 L'équation-bilan de la réaction, correctement équilibrée, est :



- 2 On lit sur l'équation-bilan précédente que, pour que les réactifs soient dans les conditions stœchiométriques, il faudrait une quantité de matière en ammoniac double de celle en dioxyde de carbone. Ce n'est pas le cas, la quantité de matière en ammoniac est inférieure au double de celle de dioxyde de carbone, donc l'ammoniac est le réactif limitant. La réaction s'arrête donc quand tout l'ammoniac est consommé.

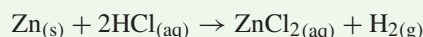
On lit également sur l'équation-bilan que la quantité de matière en urée obtenue est égale à la moitié de la quantité de matière en ammoniac ayant réagi. On obtient donc 1,5 mol d'urée.

9 Équilibrer des équations

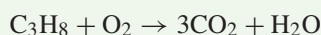
➔ Énoncé
p. 280

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 :



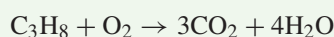
LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

COURS

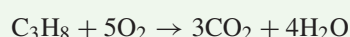
INTERROS

CORRIGÉS

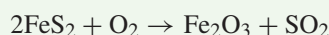
De la même manière, l'élément hydrogène n'est présent que dans un réactif et un produit. Pour assurer sa conservation, il faut ajuster le coefficient stœchiométrique de l'eau :



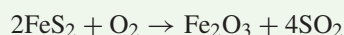
Il ne nous reste plus qu'à assurer la conservation de la quantité de matière en atomes d'oxygène. Nous avons $3 \times 2 + 4 = 10$ atomes d'oxygène dans les produits, il nous faut donc cinq molécules de dioxygène dans les réactifs pour en assurer la conservation :



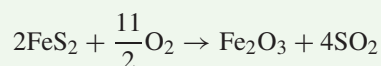
- 3** L'élément fer et l'élément soufre, respectivement, ne sont présents que dans un réactif et dans un produit. Commençons ainsi à équilibrer l'élément fer. On voit qu'il faut deux moles de sulfure de fer dans les réactifs pour assurer la conservation de la quantité de matière d'atomes de fer :



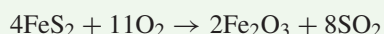
Il nous faut assurer à présent la conservation de l'élément soufre, ce qui se fait en ajustant le coefficient stœchiométrique du dioxyde de soufre :



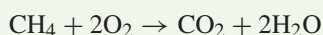
Pour finir nous équilibrons les quantités de matière en atomes d'oxygène. Les coefficients des produits sont fixés, le seul coefficient que nous puissions ajuster est celui du dioxygène dans les réactifs :



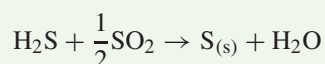
Il est légitime d'avoir des coefficients non entiers si l'on raisonne au niveau des quantités de matière. Si l'on raisonne, en revanche, directement au niveau du nombre d'entités élémentaires, on préférera utiliser des coefficients entiers. Pour ce faire, on multiplie par deux tous les coefficients de l'équation-bilan ci-dessus :



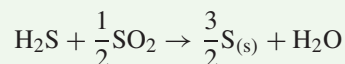
- 4** Nous utilisons ici la même procédure que pour la deuxième question. Nous obtenons :



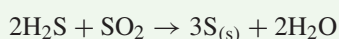
- 5** L'élément hydrogène et l'élément oxygène ne sont présents chacun que dans un seul réactif et dans un seul produit. L'élément hydrogène est déjà équilibré, donc on ne touche pas aux coefficients stœchiométriques du sulfure d'hydrogène et de l'eau. Nous équilibrons à présent les quantités de matière en atomes d'oxygène :



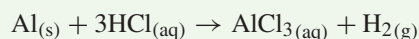
Enfin, il nous faut équilibrer les quantités de matière en atomes de soufre, de la manière suivante :



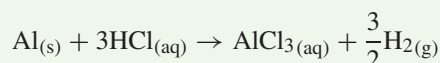
De la même manière que précédemment, nous nous ramenons à des coefficients entiers en multipliant par le plus petit commun multiple des dénominateurs, à savoir, ici, 2 :



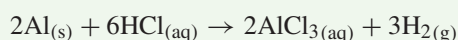
- 6** L'élément aluminium étant déjà équilibré, on ne touche pas aux coefficients stœchiométriques de l'aluminium (dans les réactifs) et du chlorure d'aluminium (dans les produits). On peut donc équilibrer la quantité de matière en atomes de chlore :



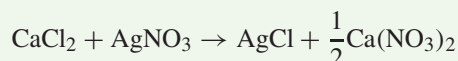
puis en atomes d'hydrogène :



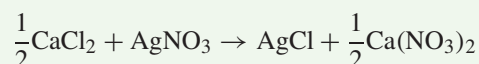
Pour terminer nous nous ramenons à des coefficients entiers :



- 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 :



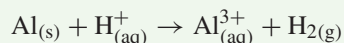
LES RÉACTIONS CHIMIQUES • CHAP. 17

10 Équilibrer les équations

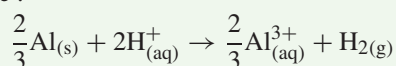
Énoncé
p. 280

Lycée Paul Langevin, Suresnes

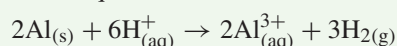
- 1 On commence par écrire l'équation bilan de la réaction, non équilibrée. Du côté des réactifs nous avons l'aluminium Al et des ions H^+ . Du côté des produits nous avons du dihydrogène H_2 et des ions aluminium Al^{3+} . Ainsi :



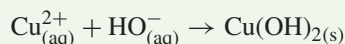
Il nous faut à présent équilibrer cette équation bilan. On commence par équilibrer les quantités de matière en hydrogène, puis on équilibre la charge électrique, et enfin on équilibre les quantités de matière en aluminium. Ceci donne :



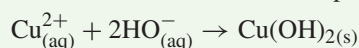
que l'on peut réécrire de la manière suivante, si l'on souhaite avoir des coefficients stœchiométriques entiers :



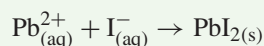
- 2 On voit que les ions sulfate et sodium sont spectateurs : ils n'interviennent pas dans l'équation-bilan de la réaction. Celle-ci, non équilibrée, est donc :



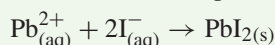
On équilibre la quantité de matière en hydroxyde, puis on vérifie que la charge des réactifs est nulle, à l'instar de celle du produit. On obtient :



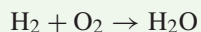
- 3 L'équation-bilan de la réaction, non équilibrée, est :



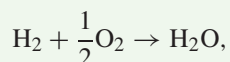
On équilibre les quantités de matière en iode, et on vérifie que la charge des réactifs est nulle, à l'instar de celle du produit. On obtient :



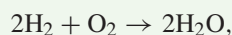
- 4 L'équation-bilan non équilibrée est bien sûr :



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 :



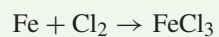
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

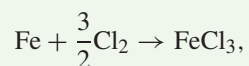
CORRIGÉS

- 5 L'équation-bilan de la réaction, non équilibrée, est :

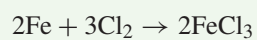


La quantité de matière en fer est conservée.

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 :



Chapitre 18

Identification et synthèse d'espèces chimiques

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Corps purs et mélanges
3. Identification d'espèces chimiques courantes
4. Généralités sur les synthèses d'espèces chimiques

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 :

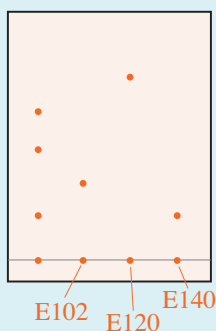


Figure 18.1 – Chromatogramme du sirop de menthe et de colorants.

- 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 296

Nous présentons dans ce chapitre diverses techniques destinées à identifier ou synthétiser des espèces chimiques. En classe, elles seront essentiellement abordées en Travaux Pratiques.

2 Corps purs et mélanges

Définition 1

Un corps pur est une substance composée d'une seule espèce chimique.

Définition 2

Un mélange est une substance composée de plusieurs espèces chimiques.

Corps pur et mélange sont donc opposés l'un de l'autre : une substance chimique est soit un corps pur, soit un mélange, et ne peut être les deux à la fois.

Exemples

- Un cube de fer, de l'eau (quelle qu'en soit la forme : vapeur, liquide ou solide), de l'aluminium, de l'azote, etc. sont des corps purs
- L'air, de l'eau salée, une émulsion eau et huile, etc. sont des mélanges

Les mélanges peuvent, en outre, être soit homogènes, soit hétérogènes.

Définition 3

Un mélange est dit homogène si tous ses composants se trouvent dans la même phase, tandis qu'il est dit hétérogène si deux au moins de ses composants se trouvent dans des phases différentes.

Notons qu'un mélange peut être constitué de différentes espèces chimiques toutes en phase liquide (par exemple) et être pourtant un mélange hétérogène, si ces phases liquides sont non-miscibles. C'est le cas de l'émulsion eau-huile, qui est un mélange hétérogène.

Le mélange « eau salée » est en revanche un mélange homogène, qui ne comprend qu'une phase liquide.

2.1 Un mélange particulièrement important : l'air

L'air est constitué de plusieurs espèces chimiques. En volume et par ordre décroissant, elles sont :

- le diazote (N_2), qui en volume représente 78 % de l'air ;

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

- le dioxygène (O_2), qui représente 21 % en volume ;
- le 1 % restant est constitué d'autres gaz à l'état de trace.
 - Parmi ceux-ci, le plus important est de loin l'argon (Ar), un gaz noble, qui représente 0,93 % de l'air en volume.
 - Les autres gaz présents à l'état de trace sont l'ozone, le dioxyde de carbone CO_2 (dont la proportion en volume a presque doublé depuis le début de l'ère industrielle), la vapeur d'eau (dont la proportion est variable et dépend — par définition — du degré d'humidité de l'air), etc.

Au niveau de la mer, la masse volumique de l'air à 15 °C est de $1,225 \text{ kg.m}^{-3}$. Cette masse volumique est très inférieure (de trois ordres de grandeur) à celle de l'eau liquide, qui est $1,00 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

À RETENIR

L'air est composé en volume de 78 % de diazote et 21 % de dioxygène. Sa masse volumique est d'environ $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ au niveau de la mer.

2.2 Composition massique d'un mélange

Définition 4

La composition massique d'un mélange indique la proportion, en masse, de chacune des espèces présentes dans le mélange.

La composition massique d'un mélange est donc un ensemble de pourcentages, un par espèce, caractérisant le mélange. La somme du pourcentage de toutes les espèces du mélange doit bien entendu donner 100 %.

3 Identification d'espèces chimiques courantes

Nous résumons dans un premier temps des tests classiques d'espèces chimiques courantes. Dans un second temps nous présentons des tests physiques (c.-à-d. n'impliquant pas de réaction chimique) permettant de caractériser des espèces.

 Retrouvez les quatre tests suivants en vidéo avec 

3.1 Test d'identification du dioxyde de carbone

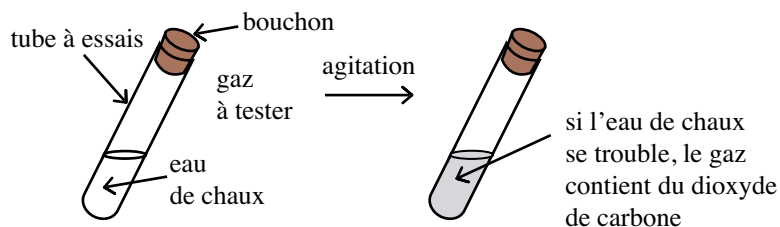
Pour identifier la présence de dioxyde de carbone (CO_2), qui est un gaz incolore et inodore, on utilise le test à l'eau de chaux.

Voir illustration page suivante.

COURS

INTERROS

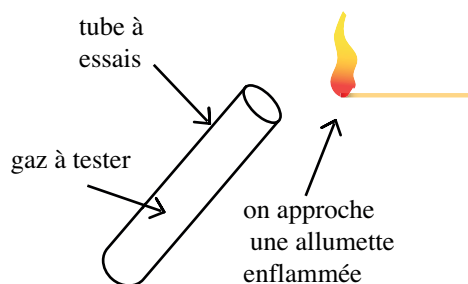
CORRIGÉS



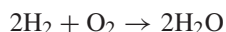
Si l'eau de chaux se trouble (c.-à-d. devient opaque et blanchâtre), cela signifie que le gaz que l'on a testé contenait du dioxyde de carbone.

3.2 Test d'identification du dihydrogène

Pour identifier le dihydrogène (H_2), qui est un gaz incolore et inodore, on utilise sa propension à réagir de manière explosive avec le dioxygène pour former de l'eau.



On approche une allumette enflammée de l'orifice du tube à essais ouvert. Si une petite détonation se fait entendre, cela montre que le gaz à tester contenait du dihydrogène, qui a réagi avec le dioxygène de l'air (contenu initialement dans le tube à essais, ou qui s'est introduit dans ce dernier par l'ouverture pendant qu'on approchait l'allumette), selon la réaction :

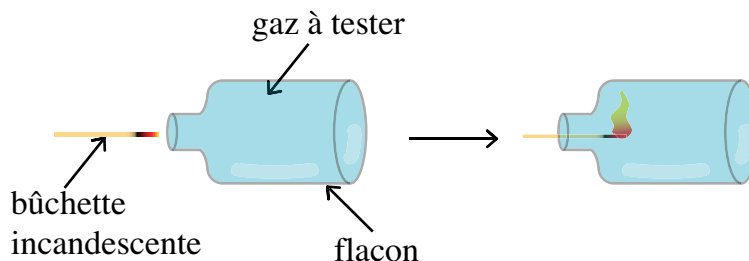


Des gouttelettes d'eau, produit de cette réaction, apparaissent également sur les parois du tube.

3.3 Test d'identification du dioxygène

Pour identifier le dioxygène (O_2), qui est un gaz incolore et inodore, on utilise le fait que ce dernier est le comburant des réactions de combustion courantes : on introduit une bûchette incandescente dans un milieu où l'on veut tester la présence de dioxygène. Si la flamme se ranime, cela indique que le gaz à tester est du dioxygène.

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18



3.4 Test d'identification de l'eau

Pour identifier la présence d'eau, on peut utiliser le test au sulfate de cuivre anhydre (« an-hydre » signifie « sans eau »). Le sulfate de cuivre anhydre se présente sous forme d'une poudre blanche. En présence de traces d'eau, il tend à s'hydrater et prend alors une couleur bleue caractéristique.

3.5 Tests physiques

On peut mesurer les propriétés physiques d'un composé, comme sa masse volumique 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.

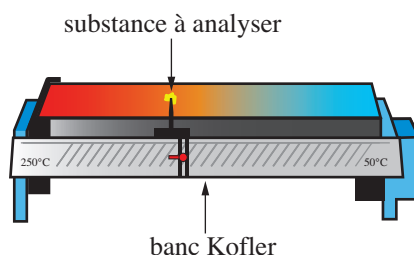


Figure 18.2 – Représentation schématique d'un banc Kofler.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

3.6 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.

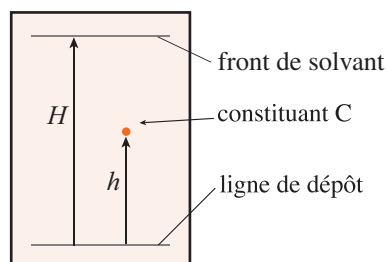


Figure 18.3 – Parties caractéristiques d'un chromatogramme.

4 Généralités sur les synthèses d'espèces chimiques

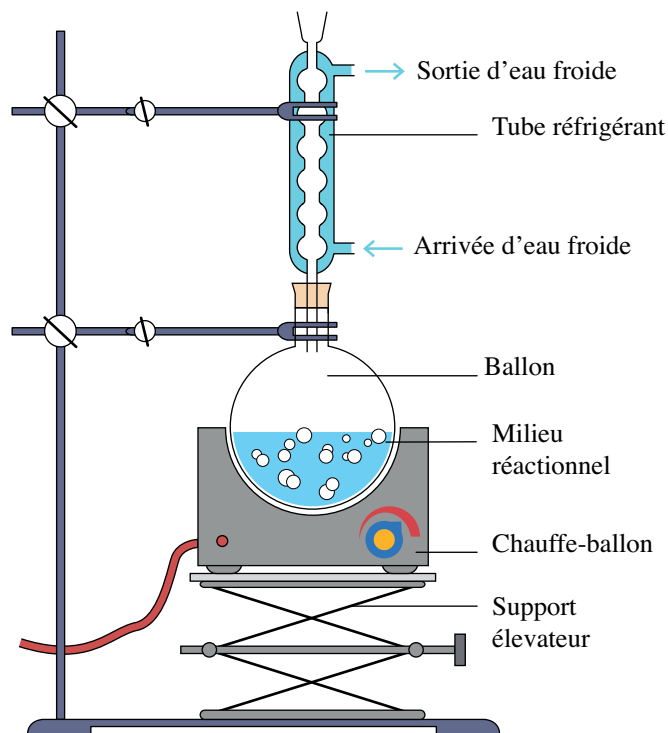
Il est possible de synthétiser en laboratoire des espèces chimiques présentes dans la nature. Les espèces obtenues sont alors indiscernables de celles que l'on trouve à l'état naturel. Il est d'ailleurs parfois plus facile (c'est-à-dire moins coûteux) de synthétiser une espèce chimique que de l'extraire d'un milieu naturel. Nous prenons ci-dessous comme exemple la synthèse de l'arôme de la banane.

On introduit dans un ballon 20 mL d'alcool isoamylique et 30 mL d'acide éthanóïque. On ajoute alors goutte à goutte 1 mL d'acide sulfurique concentré.

On fait chauffer le milieu réactionnel en utilisant un chauffe-ballon, et on le porte à ébullition pendant une demi-heure.

Voir illustration page ci-contre.

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18



La colonne ou tube réfrigérant au-dessus du ballon sert à condenser les vapeurs issues du milieu réactionnel. Au contact de la paroi interne du tube réfrigérant, refroidie de l'extérieur par une circulation d'eau froide, les vapeurs se condensent en gouttelettes qui retombent dans le milieu réactionnel. Ce type de montage, appelé pour cette raison « montage à reflux », permet de porter à ébullition sur des durées prolongées un milieu réactionnel sans perdre de réactifs ou de produits.

À l'issue de la réaction, le milieu réactionnel contient de l'acétate d'isoamyle, qui est le nom courant de l'arôme de la banane. Il faut ensuite l'isoler et l'extraire. Pour ce faire, une technique courante consiste à utiliser l'ampoule à décanter.

Une technique d'extraction et de séparation : la 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 décanter pour séparer les deux phases.

En général, les deux phases non 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 décanter.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

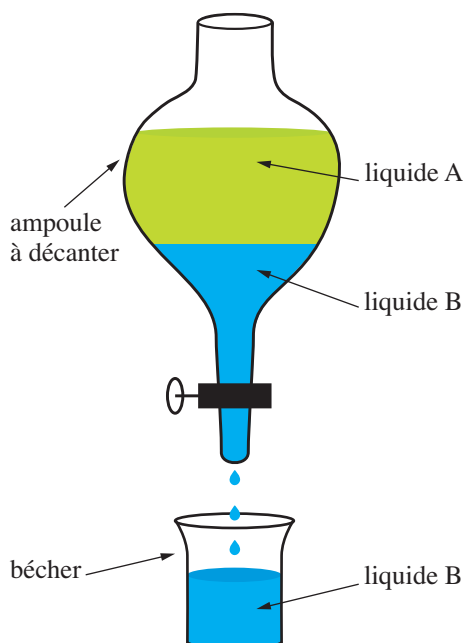


Figure 18.4 – Utilisation d’une ampoule à décanter. Les liquides A et B ne sont pas miscibles entre eux. On recueille dans le bêcher le liquide le plus dense (ici B).

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 289

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

1 QCM Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 303

- 1 On peut utiliser une ampoule à décanter pour séparer deux liquides
 - a miscibles entre eux
 - b non miscibles entre eux
- 2 Un montage à reflux permet (plusieurs choix) :
 - a de refroidir de l'eau
 - b d'éviter la perte de produits de la réaction.
 - c d'éviter la perte de réactifs de la réaction.
 - d de faire refluer des réactifs ou des produits dans le milieu réactionnel
 - e de refroidir le contenu du ballon
- 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 Le sulfate de cuivre anhydre
 - a a une couleur blanche
 - b a une couleur rouille
 - c a une couleur bleue
- 6 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
- 7 Le test de la bûchette incandescente permet d'identifier le dioxygène à l'état de trace.
 - a Vrai
 - b Faux

2 Analyse d'une boisson



5 min

Corrigé
p. 303

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

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

échantillon d'aspartame. On admettra que l'aspartame a un rapport frontal supérieur à celui du saccharose.

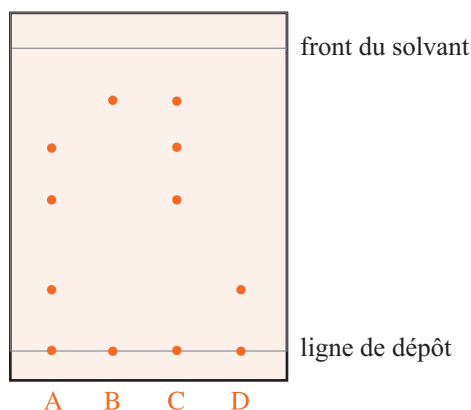


Figure 18.5 – Chromatogramme décrit dans l'énoncé.

- 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.

3 Vocabulaire



5 min

Corrigé
p. 304

Lycée Notre-Dame des Oiseaux, Paris

Donner le nom des accessoires représentés ci-dessous.

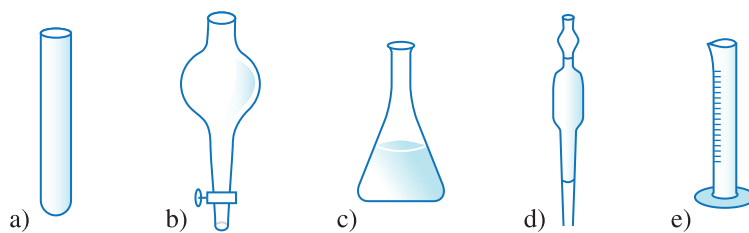


Figure 18.6 – Divers accessoires de verrerie.

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

4 Rapports d'élution

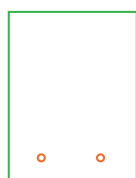


5 min

Corrigé
p. 304

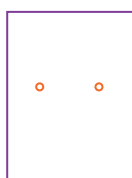
Lycée Jean-Baptiste Say, Paris

diéthyléthane



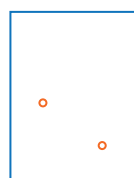
A B

hexane



A B

acétone



A B

Figure 18.7 – 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 18.7. Quel est le meilleur éluant et pourquoi ?

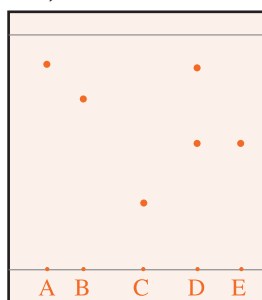
5 Chromatographie sur couche mince



10 min

Corrigé
p. 304

Lycée Florent-Schmitt, Saint-Cloud



front du solvant

ligne de dépôt

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 ?

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

6 Composition de médicaments



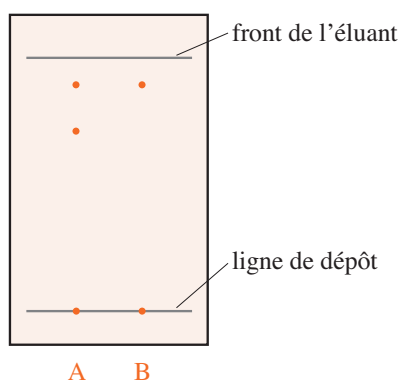
15 min

Corrigé
p. 305

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.

- 1 De quelle distance ont migré respectivement la caféine et le paracétamol ?
- 2 Représenter à l'échelle le chromatogramme obtenu.
- 3 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 La synthèse de la menthone



20 min

Corrigé
p. 306

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

La menthone est une espèce chimique à l'odeur agréable utilisée comme additif dans le domaine de l'hygiène dentaire et présente dans l'huile essentielle de menthe poivrée. Elle est obtenue par synthèse. On fait réagir 25,4 g de permanganate de potassium avec 45,6 g de menthol de formule $C_{10}H_{20}O$.

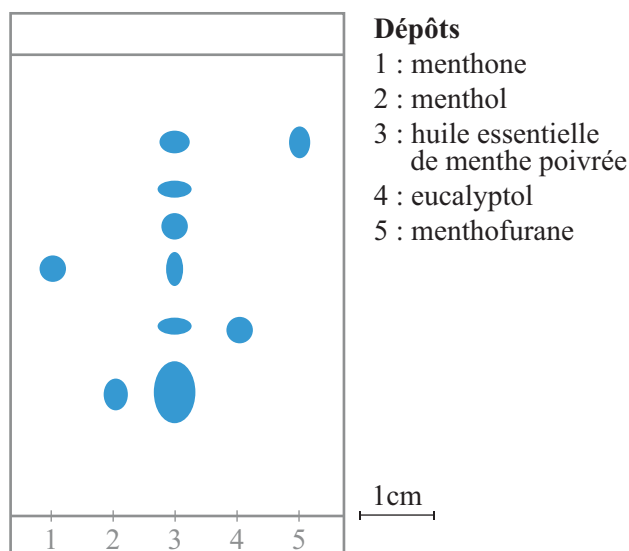
On chauffe à reflux pendant une heure.

- 1 Faire le schéma légendé du montage à reflux.
- 2 Expliquer le principe du chauffage à reflux.

Pour analyser la menthone obtenue par hydro distillation de l'huile essentielle de menthe poivrée, on souhaite réaliser une chromatographie sur couche mince.

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

On réalise ensuite la chromatographie et on obtient le chromatogramme ci-dessous :



- 3 L'huile essentielle extraite contient-elle de la menthone ? Justifier.
- 4 L'huile essentielle extraite contient-elle d'autres espèces chimiques ? Si oui, lesquelles ?
- 5 Calculer le rapport frontal R_f de la menthone.

8 Suivi de synthèse



20 min

Corrigé
p. 307

Lycée Notre-Dame de Sion, Paris

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec

L'acide benzoïque $C_6H_5CO_2H$ 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 $C_6H_5CH_2OH$ et d'ions permanganate MnO_4^- en présence d'ions hydrogène. Compléter les coefficients stœchiométriques manquants de l'équation chimie de cette synthèse :

$$...C_6H_5CH_2OH + 4MnO_4^- + ...H^+ \rightarrow 3C_6H_5CO_2H + ...H_2O + ...MnO_2$$
- 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

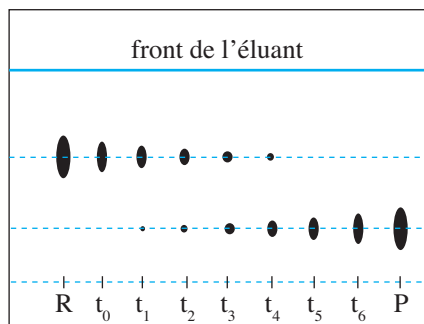
COURS

INTERROS

CORRIGÉS

INTERROS

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 ?

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

1 **QCM** Testez vos connaissances

Énoncé
p. 297

- 1 **b**. Si les liquides sont miscibles entre eux on ne peut pas les séparer avec une ampoule à décanter.
- 2 **b**, **c** et **d**
- 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 **a**. Il a une couleur blanche caractéristique.
- 6 **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.
- 7 **b**. La bûchette est incandescente dans l'air, qui contient 21 % de dioxygène en volume. Il faut donc une concentration supérieure à celle-ci pour faire repartir la flamme, et l'on peut difficilement parler de trace.

2 Analyse d'une boisson

Énoncé
p. 297

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 18.5, on trouve les valeurs indiquées ci-dessous :

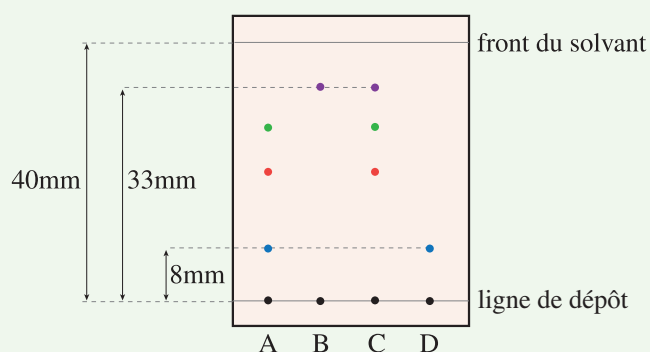


Figure 18.8 – Distances parcourues par le solvant et les différentes espèces.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

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 :

$$R_f = \frac{h_{\text{saccharose}}}{H} = \frac{8}{40} = 0,2$$

3 Vocabulaire

→ Énoncé
p. 298

Lycée Notre-Dame des Oiseaux, Paris

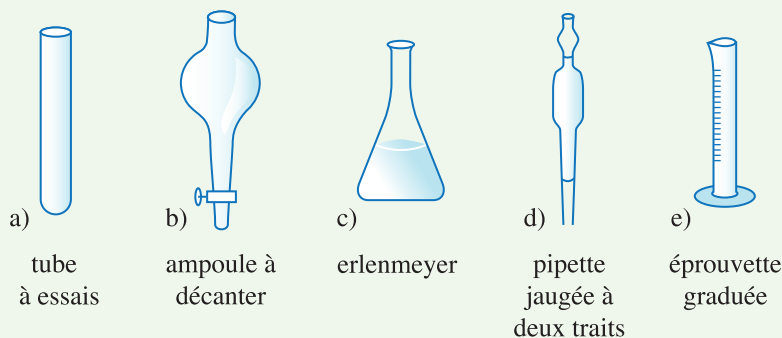


Figure 18.9 – Nom des ustensiles de verrerie.

4 Rapports d'élution

→ Énoncé
p. 299

Lycée Jean-Baptiste Say, Paris

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.

5 Chromatographie sur couche mince

→ Énoncé
p. 299

Lycée Florent-Schmitt, Saint-Cloud

- 1 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

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

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 18.10).

- 2** 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.

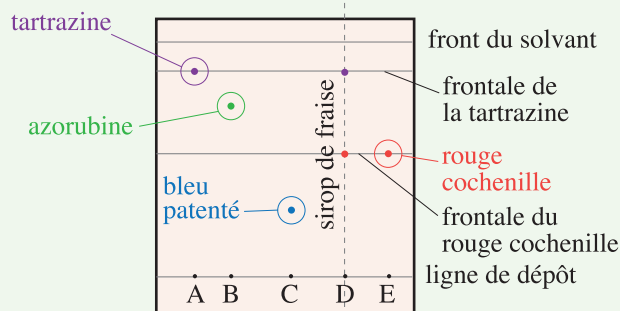


Figure 18.10 – Illustration relative à la question 1.

6 Composition de médicaments

Énoncé
p. 300

Lycée Paul Painlevé, Oyonnax

- 1** La caféine a migré de la distance

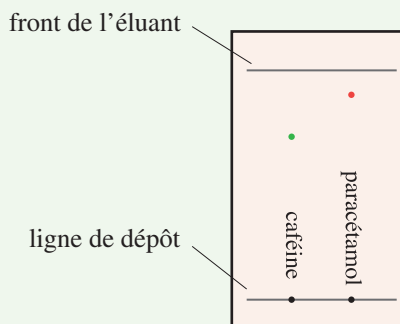
$$d_c = R_{f,c} \times H = 0,72 \times 3,8 = 2,7 \text{ cm},$$

où $R_{f,c}$ est le rapport frontal de la caféine. De la même manière, le paracétamol migre sur la distance :

$$d_p = R_{f,p} \times H = 0,89 \times 3,8 = 3,4 \text{ cm},$$

où $R_{f,p}$ est le rapport frontal du paracétamol.

- 2** On en déduit, à l'échelle, le chromatogramme ci-contre.



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 3 On voit que le médicament A donne deux taches, respectivement aux rapports frontaux de la caféine et du paracétamol : il contient donc ces deux principes actifs.

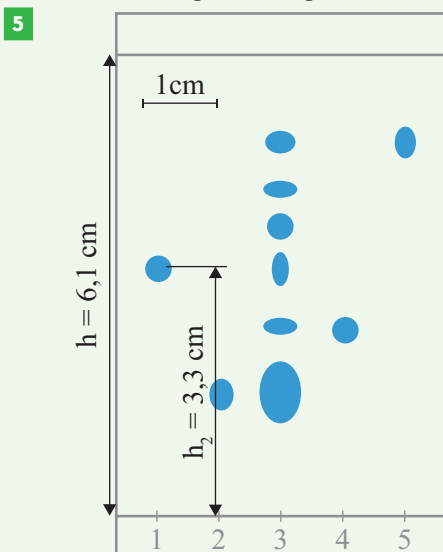
Le médicament B, en revanche, ne contient qu'une tache, au rapport frontal du paracétamol : son seul principe actif est le paracétamol.

7 La synthèse de la menthone

Énoncé
p. 300

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

- 1 Le schéma légendé demandé correspond au schéma du paragraphe 4 des rappels de cours (page 295).
Attention à ne pas inverser l'arrivée et la sortie de l'eau sur le schéma (l'arrivée d'eau se fait toujours en bas tandis que le départ de l'eau se fait toujours en haut du réfrigérant à boules).
- 2 Le milieu réactionnel est porté à ébullition dans un ballon afin d'augmenter la vitesse de réaction. Un réfrigérant est placé au dessus du milieu réactionnel afin de liquéfier les vapeurs formées lors l'ébullition. Le liquide retombe ainsi dans le milieu réactionnel ce qui permet de ne perdre ni réactif, ni produit et ainsi d'augmenter le rendement de la réaction.
- 3 Pour l'échantillon qui correspond à l'huile essentielle (échantillon 3) on observe une tache à la même hauteur que l'échantillon correspondant à la menthone (échantillon 1). L'huile essentielle contient donc de la menthone.
- 4 Par un raisonnement similaire, on peut dire que l'huile essentielle contient du menthol (échantillon 2), de l'eucalyptol (échantillon 4) et du menthofurane (échantillon 5). Elle contient également (au moins) deux autres constituants qu'il est impossible d'identifier à partir du chromatogramme.



La distance mesurée entre la ligne de départ et le front de solvant est $h_1 = 6,1$ cm.

La distance mesurée entre la ligne de départ et le centre de la tache de menthone est $h_2 = 3,3$ cm.

Le rapport frontal R_f vaut donc :

$$R_f = \frac{3,3}{6,1} \approx 0,54.$$

IDENTIFICATION ET SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES • CHAP. 18

8 Suivi de synthèse

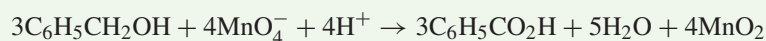
Énoncé
p. 301

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 :

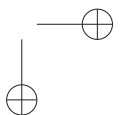
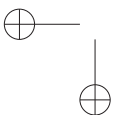
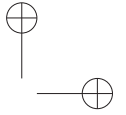
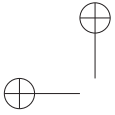


- 2 À l'état initial, le système ne contient que les réactifs de la réaction. On voit ainsi, par une lecture verticale à t_0 , que le chromatogramme est identique à celui du réactif pur, donné par une lecture verticale au-dessus de « R ».
- 3 Le temps augmente lorsqu'on se déplace vers la droite sur 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.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre 19

Transformations nucléaires

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Définition
3. Notion de transformation nucléaire

1 Introduction

Exercice type

Nouveau programme

Les régions centrales du Soleil sont le siège de transformations nucléaires. Ces transformations sont complexes, mais leur bilan net peut simplement s'énoncer comme suit : quatre noyaux d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ sont transformés, par des réactions de fusion, en un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$. Chacune de ces transformations produit la quantité d'énergie $e = 4,3 \times 10^{-12} \text{ J}$.

On admet que 10 % de la masse du Soleil se transforme de cette manière au cours de son existence.

- 1 Calculer le nombre N de noyaux d'hélium créés au cours de l'existence du Soleil.
- 2 Quelle est la quantité de matière correspondante ?
- 3 Quelle est l'énergie totale produite par ces transformations ?
- 4 La luminosité du Soleil est la quantité d'énergie qu'il dégage par unité de temps. Elle provient de la transformation de l'hydrogène en hélium et vaut $L = 3,8 \times 10^{26} \text{ J.s}^{-1}$. Combien faut-il de temps pour effectuer la transformation de 10 % de la masse du Soleil en hélium ? On exprimera ce résultat en secondes, puis en années.

Donnée :

Masse du Soleil : $M_S = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$

Masse du proton : $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Voir corrigé page 312

Cet exercice aborde les transformations nucléaires et les transferts énergétiques associés.

2 Définition

Définition 1

On appelle *isotopes* deux noyaux du même élément qui diffèrent par leur nombre de masse.

Ainsi, deux isotopes diffèrent par leur nombre de neutrons, mais ont nécessairement même nombre de protons, puisqu'ils représentent le même élément.

Exemples

Il existe trois isotopes principaux de l'élément carbone.

Le plus courant est le « carbone 12 » ($^{12}_6\text{C}$).

Le deuxième par ordre d'abondance est le « carbone 13 » ($^{13}_6\text{C}$).

Enfin, le « carbone 14 » ($^{14}_6\text{C}$), est un isotope radioactif particulièrement important pour dater les restes de matière organique sur des périodes de temps remontant jusqu'à environ 35 000 ans.

3 Notion de transformation nucléaire

Nous avons vu dans les chapitres précédents la notion de transformation physique, qui ne change pas les espèces présentes dans le milieu mais correspond à un changement de leur état. Nous avons ensuite étudié la notion de transformation ou réaction chimique. Les espèces présentes dans le milieu réactionnel changent, mais les atomes constituant leurs molécules demeurent inchangés : les réactions chimiques correspondent à un changement de l'agencement des atomes. Des liaisons disparaissent, d'autres apparaissent, mais les atomes gardent leur identité : leurs noyaux ne changent pas.

Ici nous abordons un type de transformation différent, où ce sont les noyaux qui vont être modifiés.

Définition 2

Au cours d'une transformation nucléaire, les différents noyaux des espèces présentes vont être modifiés.

Remarque : le mot « nucléaire » vient du latin *nucleus*, qui signifie « noyau ».

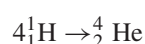
Alors que les réactions chimiques conservent les éléments (et leur quantité de matière, raison pour laquelle on doit équilibrer les équations-bilan), les réactions nucléaires ne les conservent pas toujours !

Considérons ainsi la transformation nucléaire de l'exercice type : l'élément hydrogène disparaît alors que l'hélium est créé. L'apparition ou disparition d'éléments chimiques est impossible lors de réactions chimiques, et est le propre des réactions nucléaires.

TRANSFORMATIONS NUCLÉAIRES • CHAP. 19

3.1 Écriture symbolique des transformations nucléaires

On écrit de manière symbolique les transformations nucléaires de manière analogue aux transformations chimiques : on met ce qui disparaît à gauche et ce qui est créé à droite, séparés par une flèche. Ainsi, le bilan des réactions conduisant à la transformation de l'exercice type peut s'écrire :



Remarques

- Il se créent d'autres entités que les noyaux d'hélium. L'écriture ci-dessus ne les fait pas apparaître. Ces autres produits peuvent être déterminés à partir de règles de conservation satisfaites par les transformations nucléaires (qui ne sont pas au programme de Seconde).
- Au contraire des réactions chimiques, pour lesquelles nous n'écrivons pas les nombres de masse et numéros atomiques, on fait figurer ceux-ci dans l'écriture d'une transformation nucléaire, de manière à spécifier quels sont les isotopes en jeu. Différents isotopes ne donnent pas lieu aux mêmes réactions nucléaires, et les réactions nucléaires produisent des isotopes bien spécifiques.
- Il arrive que l'une des entités impliquées dans des transformations nucléaires soit un neutron. On le note alors $\text{}^1_0\text{n}$ (un nucléon au total, et ce n'est pas un proton).

3.2 Différents types de réactions nucléaires

Nous pouvons classer les réactions nucléaires en plusieurs types :

- Les nucléons de noyaux « légers » (c.-à-d. de petit nombre de masse A) peuvent se regrouper pour former des noyaux plus massifs (de nombre de masse plus grand). On parle de *fusion*. C'est le cas de la transformation de l'exercice type.
- Des noyaux comportant un grand nombre de nucléons peuvent se scinder en plusieurs noyaux plus petits. On parle de *fission*.
- Certains noyaux sont naturellement instables et donnent spontanément lieu à des transformations nucléaires. On dit que ces noyaux sont radioactifs.

Des réactions de fusion ont lieu à l'intérieur de l'immense majorité des étoiles, et en particulier de toutes les étoiles visibles à l'œil nu. Les réactions de fission ont lieu à l'intérieur des centrales nucléaires. Il existe également des preuves qu'elles ont eu lieu à l'état naturel sur le site d'Oklo, au Gabon, il y a 1,7 milliards d'années.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

➔ Solution de l'exercice type

Nouveau programme

- 1 Calculons le nombre de noyaux d'hydrogène ${}^1_1\text{H}$ (c.-à-d. de protons) qui réagissent au cours de l'existence du Soleil. La masse totale qui réagit est $0,10M_{\text{S}}$, et le nombre de protons N_p qui réagit est donc :

$$N_p = \frac{0,10M_{\text{S}}}{m_p}.$$

Le nombre de noyaux d'hélium produit est égal au quart du nombre de protons qui réagissent et vaut donc :

$$N = \frac{N_p}{4} = \frac{0,10M_{\text{S}}}{4m_p}.$$

L'application numérique donne :

$$N = \frac{0,10 \times 2,0 \times 10^{30}}{4 \times 1,67 \times 10^{-27}} = 3,0 \times 10^{55}.$$

- 2 La quantité de matière n correspondante s'obtient par la formule vue en cours :

$$n = \frac{N}{6,0 \times 10^{23}} = 5,0 \times 10^{31} \text{ mol}.$$

 MÉTHODE

Il n'y a pas lieu d'écrire le dénominateur avec plus de deux chiffres significatifs, puisque c'est la précision avec laquelle on connaît le numérateur.

Le concept de quantité de matière a été introduit pour éviter d'avoir à manipuler de très grands nombres. Toutefois ici, exceptionnellement, même la quantité de matière en mole est un nombre extrêmement grand.

- 3 Pour chaque noyau d'hélium créé on produit l'énergie e , donc l'énergie totale produite par ces transformations est :

$$E = Ne.$$

L'application numérique donne :

$$E = 3,0 \times 10^{55} \times 4,3 \times 10^{-12} = 1,3 \times 10^{44} \text{ J}.$$

TRANSFORMATIONS NUCLÉAIRES • CHAP. 19

➔ Solution de l'exercice type (suite)

Nouveau programme

- 4 Le temps T que met le Soleil pour transformer 10 % de sa masse en hélium est égale à l'énergie totale produite divisée par l'énergie produite par seconde :

$$T = \frac{E}{L}.$$

L'application numérique donne :

$$T = \frac{1,3 \times 10^{44}}{3,8 \times 10^{26}} = 3,4 \times 10^{17} \text{ s.}$$

Pour exprimer ce résultat en année, nous le divisons par le nombre de secondes qu'il y a dans une année, qui vaut :

$$n = 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 3,2 \times 10^7.$$

🔧 MÉTHODE

Il n'y a pas lieu de donner la durée d'une année en jours avec plus de chiffres significatifs, puisque la précision avec laquelle nous connaissons T est de deux chiffres significatifs.

Nous obtenons :

$$T = \frac{3,4 \times 10^{17}}{3,2 \times 10^7} = 1,1 \times 10^{10} \text{ années.}$$

La durée de vie du Soleil est donc d'environ 11 milliards d'années.

Voir énoncé page 309

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

10 min **Corrigé**
p. 316

- 1** Il peut y avoir apparition d'un nouvel élément au cours d'une transformation
☐ chimique ☐ nucléaire
- 2** Il peut y avoir disparition d'un élément au cours d'une transformation
☐ chimique ☐ nucléaire
- 3** Les contrats d'assurance comportent fréquemment une clause d'exclusion mentionnant les « conséquences des effets directs et indirects d'explosion, de dégagement de chaleur, d'irradiation provenant de la transmutation des noyaux d'atome ». Cette clause se réfère-t-elle à des transformations nucléaires ?
☐ Oui ☐ Non
- 4** Le carbone 14 ($^{14}_6\text{C}$) et l'azote 14 ($^{14}_7\text{N}$) sont des isotopes.
☐ Vrai ☐ Faux
- 5** Parmi les transformations suivantes, identifier celles qui correspondent à des transformations nucléaires.
☐ $2\text{C}_8\text{H}_{18} + 25\text{O}_2 \rightarrow 16\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O}$
☐ $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
☐ $^{13}_6\text{C} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{14}_7\text{N}$
☐ $\text{HO}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
☐ $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n}$
- 6** Certaines étoiles, à la fin de leur existence, sont brièvement le siège de la transformation suivante en leur centre : l'hélium 4 (^4_2He) est converti en carbone 12 ($^{12}_6\text{C}$). On parle de flash de l'hélium. S'agit-il d'une transformation nucléaire ?
☐ Oui ☐ Non
- 7** La transformation de la question précédente est une réaction
☐ chimique ☐ de fusion ☐ de fission
- 8** Sans consulter un tableau périodique, identifier l'intrus, sachant qu'il n'y en a qu'un :
☐ $^{14}_7\text{N}$ ☐ $^{14}_6\text{C}$ ☐ $^{13}_6\text{C}$
☐ $^{226}_{88}\text{Ra}$ ☐ $^{226}_{88}\text{Rn}$ ☐ $^{225}_{88}\text{Ra}$

TRANSFORMATIONS NUCLÉAIRES • CHAP. 19

2 Centrale nucléaire



15 min

Corrigé
p. 316

Au sein du réacteur d'une centrale nucléaire, les noyaux d'uranium 235 sont transformés par des réactions nucléaires de fission et peuvent donner de nombreux noyaux moins massifs. Nous admettons qu'en moyenne la fission d'un noyau d'uranium 235 libère une énergie de $3,2 \times 10^{-11}$ J.

- 1 Quelle est l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 ?
- 2 La puissance du réacteur est de 100 MW. Quelle énergie électrique produit-il en 24 heures ?
- 3 En faisant l'hypothèse simplificatrice que toute l'énergie produite par la fission de l'uranium 235 est convertie en énergie électrique, quelle masse d'uranium 235 faut-il utiliser pour faire fonctionner le réacteur pendant un mois ?

On donne la masse du neutron : $m_n = 1,67 \times 10^{-27}$ kg.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 314

- 1 Réponse **b**
- 2 Réponse **b**
- 3 Réponse **a**. C'est ce que signifie l'expression « transmutation des noyaux d'atomes ».
- 4 Réponse **b**. Ces deux noyaux ne peuvent être isotopes car ils correspondent à des éléments différents.
- 5 Réponses **c** et **e**. Toutes les autres sont des réactions chimiques.
- 6 Réponse **a**. En effet, il y a disparition d'un élément (l'hélium) et apparition d'un autre (le carbone).
- 7 Réponse **b** car on fabrique un noyau plus massif à partir de noyaux « légers ».
- 8 **e**. Les éléments des trois premiers noyaux ont été mentionnés en cours. Manifestement il y a un problème avec les trois derniers, puisqu'il ont tous le même numéro atomique mais pas tous le même symbole. Puisqu'il n'y a qu'un intrus, c'est nécessairement $^{226}_{88}\text{Rn}$ (le radon, de symbole Rn, a en fait pour numéro atomique 86). Les noyaux **d** et **f** sont des isotopes du radium.

2 Centrale nucléaire

Énoncé
p. 315

- 1 Il nous faut évaluer le nombre de noyaux d'uranium 235 qu'il y a dans un gramme. Ainsi que nous l'avons vu dans un chapitre antérieur, la masse d'un atome est pratiquement égale à son nombre de masse multiplié par la masse du neutron et vaut donc ici :

$$m_{\text{uranium 235}} = 235m_n = 3,9 \times 10^{-25} \text{ kg.}$$

Le nombre d'atomes (et donc de noyaux) d'uranium 235 qu'il y a dans un gramme est par conséquent :

$$n = \frac{10^{-3}}{3,9 \times 10^{-25}} = 2,5 \times 10^{21}.$$

Leur fission libère au total une énergie :

$$e = n \times 3,2 \times 10^{-11} = 8,0 \times 10^{10} \text{ J.}$$

- 2 Nous avons $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$. Par ailleurs un watt représente un joule par seconde. En une seconde, l'énergie électrique produite par le réacteur est donc 10^6 J , et en vingt-quatre heures elle vaut :

$$E = 10^6 \times 60 \times 60 \times 24 = 8,6 \times 10^{12} \text{ J.}$$

TRANSFORMATIONS NUCLÉAIRES • CHAP. 19

- 3** En un mois l'énergie que produit le réacteur est $30 \times E = 2,6 \times 10^{14}$ J. Puisque l'énergie libérée par la fission d'un gramme est e , la masse nécessaire est :

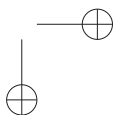
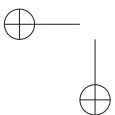
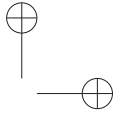
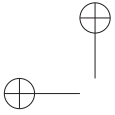
$$M = \frac{30E}{e} = \frac{2,6 \times 10^{14}}{8,0 \times 10^{10}} = 3\,300 \text{ g} = 3,3 \text{ kg}.$$

Dans la pratique, le rendement de la fission n'est bien entendu pas égal à 100 %. Il est de l'ordre de 30 %. La masse requise pour le fonctionnement du réacteur pendant un mois est donc $3\,300/0,3 = 11\,000 \text{ g} = 11 \text{ kg}$.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Chapitre 20

Mesure et incertitudes

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Étude d'une série de mesures

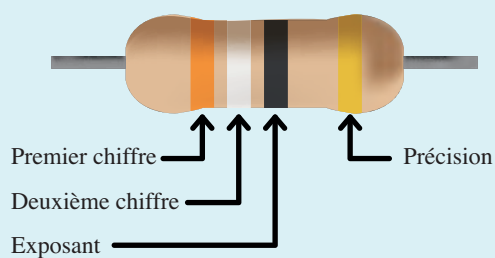
1 Introduction

Exercice type

La résistance R d'un conducteur ohmique est mesurée successivement par 10 élèves, chacun étant équipé de son propre multimètre. Ils obtiennent les mesures suivantes :

155,1 k Ω , 153,1 k Ω , 155,7 k Ω , 155,8 k Ω , 156,1 k Ω ,
154,3 k Ω , 156,8 k Ω , 157,2 k Ω , 155,8 k Ω et 154,9 k Ω .

- 1 Représenter l'histogramme de ces mesures. On prendra des intervalles de largeur 1 k Ω entre 152 et 159 k Ω .
- 2 En utilisant un logiciel tableur, calculer la moyenne et l'écart-type de l'échantillon de ces valeurs.
- 3 Quelle est l'incertitude type ?
- 4 Les fabricants utilisent un code couleur pour spécifier la valeur de la résistance et sa précision. Leur signification est donnée par la figure suivante :



Exercice type (suite)

Pour les deux premiers anneaux (chiffres) :

Couleur	Chiffre
Noir	0
Marron	1
Rouge	2
Orange	3
Jaune	4
Vert	5
Bleu	6
Violet	7
Gris	8
Blanc	9

Pour le multiplicateur :

Couleur	Multiplicateur
Noir	$\times 1 \Omega$
Marron	$\times 10 \Omega$
Rouge	$\times 100 \Omega$
Orange	$\times 1 \text{ k}\Omega$
Jaune	$\times 10 \text{ k}\Omega$
Vert	$\times 100 \text{ k}\Omega$
Bleu	$\times 1 \text{ M}\Omega$
Violet	$\times 10 \text{ M}\Omega$
Gris	$\times 100 \text{ M}\Omega$
Blanc	$\times 1 \text{ G}\Omega$
Or	$\times 0,1 \Omega$

Enfin, pour la précision, nous avons les codes suivants :

Couleur	Tolérance
Marron	$\pm 1\%$
Rouge	$\pm 2\%$
Vert	$\pm 0,5\%$
Bleu	$\pm 0,25\%$
Violet	$\pm 0,1\%$
Gris	$\pm 0,05\%$
Or	$\pm 5\%$
Argent	$\pm 10\%$

Le conducteur ohmique dont les élèves ont mesuré la résistance a l'aspect suivant :



Ceci est-il compatible avec les résultats de leurs mesures ?

- 5 À votre avis, quelle est la raison de la dispersion des résultats des mesures des élèves ?

Voir corrigé page 326

Ce chapitre n'est pas spécifiquement relié à l'un des thèmes du programme. Nous y abordons les notions de dispersion de mesures et d'incertitude. Celles-ci sont susceptibles de s'appliquer à la mesure de toutes les grandeurs que l'on rencontre dans les autres parties du programme.

2 Étude d'une série de mesures

Lors d'une séance de travaux pratiques, des groupes d'élèves mesurent la vitesse du son dans l'air, avec trois chiffres significatifs. Ils obtiennent les valeurs suivantes :

380 m.s⁻¹, 340 m.s⁻¹, 350 m.s⁻¹, 320 m.s⁻¹,
330 m.s⁻¹, 340 m.s⁻¹, 360 m.s⁻¹, 350 m.s⁻¹.

Tous ces résultats ne sont pas égaux car la précision du dispositif expérimental utilisé par les élèves est limitée.

On dit que les mesures d'une grandeur physique (ici la vitesse du son) ont une *dispersion*.

Cette dispersion dépend du protocole expérimental.

Dans le cas de l'expérience des élèves, on voit bien que la vitesse du son dans les conditions de la mesure est très probablement comprise entre 330 m.s⁻¹ et 380 m.s⁻¹, et vraisemblablement vers le milieu de cet intervalle. Nous pouvons utiliser divers indicateurs statistiques pour extraire toute l'information possible de cette série de mesures et en cerner les limites.

2.1 Indicateurs numériques

Le premier indicateur qui vient à l'esprit est la *moyenne*. La moyenne des mesures est ici :

$$\overline{c_s} = \frac{380 + 340 + 350 + 320 + 330 + 340 + 360 + 350}{8} = 346,25 \text{ m.s}^{-1}.$$



En Python

```
import numpy
# On construit la liste des mesures
cs = [380, 340, 350, 320, 330, 340, 360, 350]
print( numpy.mean(cs) ) # En anglais, mean signifie moyenne
```

Ce programme affiche alors : « 346.25 ».

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

Est-ce à dire que l'on peut déduire de ces expériences, en effectuant une moyenne, la vitesse du son avec cinq chiffres significatifs ? Une telle précision paraît exagérée, lorsque chacune des mesures n'est réalisée qu'avec trois chiffres significatifs, et qu'il n'y a au total que huit mesures. Pour mieux comprendre les limites de ces mesures et trouver l'intervalle sur lequel se trouve probablement la vitesse du son dans les conditions de l'expérience, il nous faut des indicateurs statistiques qui caractérisent la dispersion des mesures.

Le premier de ces indicateurs statistiques est l'écart-type. Nous pouvons l'obtenir par divers moyens. L'un d'entre eux consiste à saisir les valeurs des résultats dans un logiciel tableur (Apache OpenOffice Calc, Excel, Google Spreadsheet, Numbers, etc.). On saisit ensuite dans une nouvelle case :

Avec un tableur

```
=ECARTYPE.STANDARD(A1:A8)
```

Remarques

- Ici la notation A1:A8 indique les cellules dans lesquelles les données ont été rentrées. On suppose dans cet exemple qu'elles se trouvent sur la colonne A, de la ligne 1 à la ligne 8.
- Selon la version de votre logiciel tableur (et la langue d'installation), la syntaxe de la commande peut varier. Au lieu de « ECARTYPE.STANDARD », on peut avoir à saisir « STDEV » (de l'anglais *standard deviation*) ou « STDEVA ».
- Votre tableur vous propose deux versions de l'écart-type. L'une est celle de l'échantillon (*sample* en anglais), l'autre est celle dite de Pearson ou de la population. Il convient d'utiliser ici celle de l'échantillon.

Lorsque l'on valide cette commande, le contenu de la cellule se retrouve remplacé par la valeur numérique de l'écart-type. Il vaut ici :

$$\sigma \approx 18,5 \text{ m.s}^{-1}.$$

Remarques

- On utilise fréquemment la lettre de l'alphabet grec σ (*sigma*) pour représenter un écart-type.
- L'écart-type a la même unité que les valeurs qu'il caractérise, donc ici il s'exprime en mètre par seconde.

On peut également évaluer l'écart-type avec Python, de la manière suivante :



En Python

```
import numpy
cs = [380, 340, 350, 320, 330, 340, 360, 350]
print( numpy.std(cs, ddof=1) )
```

Ce programme affiche alors : « 18.4681192484 ».

La valeur de l'écart-type donne une idée de la dispersion des données de part et d'autre de la moyenne. Ainsi, les mesures allaient de 330 m.s^{-1} à 380 m.s^{-1} , c.-à-d. de 16 m.s^{-1} au-dessous de la moyenne à 34 m.s^{-1} au-dessus de celle-ci, l'essentiel des mesures étant plus proche de la valeur moyenne. Ceci est compatible avec la valeur de l'écart-type.

Remarques

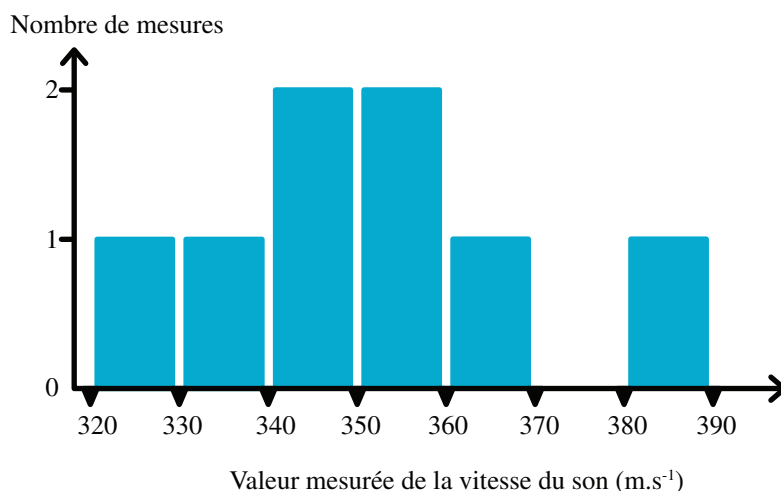
- Plus la dispersion des mesures est petite, plus l'écart-type est petit.
- L'écart-type ne peut pas être négatif. Dans le cas hypothétique où toutes les mesures seraient identiques, l'écart-type serait nul.
- Plus l'instrument de mesure est précis, plus l'écart-type de la série de mesures est petit.

2.2 Un indicateur graphique : l'histogramme

Une autre manière de jauger la dispersion des données est d'utiliser un *histogramme*. Celui-ci est une représentation graphique du nombre de mesures se trouvant dans un intervalle de valeurs. Pour construire l'histogramme des résultats de mesure des élèves pour des intervalles de 10 m.s^{-1} , on procède de la manière suivante. Il y a :

- une mesure qui tombe dans l'intervalle $[320 \text{ m.s}^{-1}, 330 \text{ m.s}^{-1}[$,
- une mesure dans l'intervalle $[330 \text{ m.s}^{-1}, 340 \text{ m.s}^{-1}[$,
- deux mesures dans l'intervalle $[340 \text{ m.s}^{-1}, 350 \text{ m.s}^{-1}[$, etc.

Nous reportons chacune de ces valeurs sous forme d'un graphe comprenant des rectangles pleins. La base de chacun de ces rectangles correspond à l'un des intervalles, et sa hauteur au nombre de mesures tombant dans l'intervalle :



COURS

INTERROS

CORRIGÉS

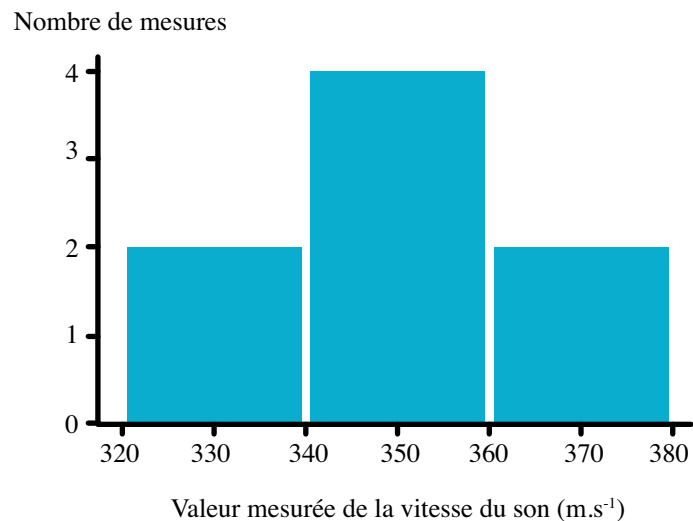
Cet histogramme peut être élaboré à l'aide d'un tableur, ou en Python. Ainsi, le code suivant :



En Python

```
import matplotlib.pyplot as plt
cs=[380, 340, 350, 320, 330, 340, 360, 350]
plt.hist(cs,bins=[320,340,360,380],rwidth=0.95)
plt.show()
```

permet de tracer l'histogramme de la figure ci-dessus. Notons qu'un histogramme dépend des intervalles choisis. Si nous avions décidé de prendre des intervalles de largeur différente, l'histogramme serait différent, comme on peut le voir sur la figure ci-après.



Un histogramme dépend de la largeur des intervalles. Ici, nous représentons l'histogramme des valeurs mesurées par les élèves en choisissant cette fois des intervalles de largeur 20 m.s⁻¹.

En règle générale, il convient que la largeur des intervalles soit comparable à ou légèrement plus petite que l'écart-type. Ici, une largeur de 10 m.s⁻¹ est un bon choix (on rappelle que l'écart-type vaut $\sigma \approx 18,5$ m.s⁻¹).

Un histogramme permet d'évaluer rapidement, de manière graphique, la dispersion de données expérimentales.

2.3 Incertitude-type

Nous voyons ainsi que la dispersion typique d'une mesure de la vitesse du son par les élèves, compte-tenu de la précision, relativement basse, du protocole expérimental, est de l'ordre de $18,5 \text{ m.s}^{-1}$. Pourtant, ne pourrait-on pas déduire, de toutes les mesures effectuées par les différents groupes, une valeur plus précise ? Nous avons vu plus haut qu'il était vraisemblablement illusoire de donner la moyenne avec cinq chiffres significatifs. Toutefois, il est assez intuitif que la moyenne des mesures ait une précision supérieure à celle des mesures individuelles. Cela nous conduit au concept d'incertitude-type.

L'écart-type σ que nous avons évalué pour les mesures effectuées par les élèves nous donne une idée de la dispersion de ces mesures. Chacune des mesures va être entachée d'une erreur dont l'ordre de grandeur est σ . En revanche, la moyenne de plusieurs de ces mesures est plus précise. L'incertitude-type nous donne une indication de l'erreur que l'on peut attendre sur la moyenne.

À RETENIR

L'incertitude-type sur la moyenne de n mesures d'écart-type σ est donnée par :

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

Dans notre exemple, nous avons $n = 8$ mesures de la vitesse du son dans l'air, donc l'incertitude-type est donnée par :

$$u = \frac{18,5}{\sqrt{8}} \approx 6,5 \text{ m.s}^{-1}.$$

Cette valeur représente l'incertitude avec laquelle la moyenne des valeurs représente la vitesse du son. Nous avons vu que cette moyenne est :

$$\overline{c_s} = 346 \text{ m.s}^{-1}.$$

Nous n'écrivons plus ici les deux chiffres après la virgule, puisque l'on sait désormais que l'erreur typique sur cette valeur moyenne est bien supérieure à 1 m.s^{-1} !

Puisque l'incertitude-type est de $6,5 \text{ m.s}^{-1}$, pouvons-nous tout de même conclure *avec certitude* que la valeur exacte de la vitesse du son est comprise entre $\overline{c_s} - u = 346 - 6,5 \approx 339 \text{ m.s}^{-1}$ et $\overline{c_s} + u = 346 + 6,5 \approx 353 \text{ m.s}^{-1}$?

Malheureusement non. Cet intervalle représente juste l'étendue des valeurs où il est raisonnable d'imaginer que se trouve la valeur exacte de la vitesse du son, mais on ne peut pas en être certain à 100 %. On peut d'ailleurs démontrer que, lorsque l'erreur de mesure obéit à certaines propriétés statistiques, alors il y a une probabilité de 68 % que la valeur exacte soit contenue dans l'intervalle $[\overline{c_s} - u, \overline{c_s} + u]$. Si nous voulons plus de certitude, alors il faut renoncer à être aussi précis : on peut démontrer qu'il y a 95 % de chances que la valeur exacte se trouve dans l'intervalle $[\overline{c_s} - 2u, \overline{c_s} + 2u]$, et 99 % de chances qu'elle se trouve dans l'intervalle $[\overline{c_s} - 3u, \overline{c_s} + 3u]$. Ce type d'intervalle est appelé *intervalle de confiance* et le pourcentage associé est le *niveau de confiance*.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

On peut écrire les résultats de la mesure et de l'incertitude-type associée de la manière suivante :

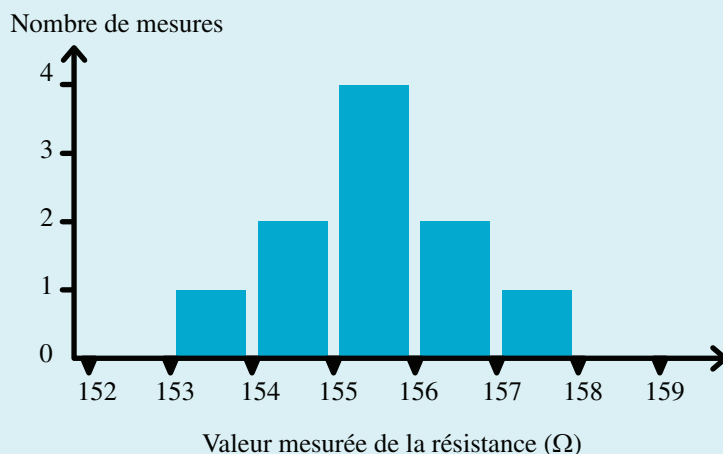
$$c_s = (346 \pm 7) \text{ m.s}^{-1}.$$

Le symbole $\pm$ signifie « plus ou moins ». On écrit toujours l'incertitude-type avec un seul chiffre significatif (on a $6,54 \approx 7 \text{ m.s}^{-1}$). Comme il s'agit ici du chiffre des unités, le dernier chiffre significatif de la moyenne doit aussi être celui des unités.

Remarque : On arrondit toujours l'incertitude-type au nombre supérieur, contrairement à la pratique pour d'autres types de résultats. En effet, si l'on arrondissait à la valeur inférieure, on diminuerait l'intervalle de confiance, et donc le niveau de confiance associé.

➔ Solution de l'exercice type

- 1 L'histogramme demandé a l'allure suivante :



- 2 La moyenne des valeurs est :

$$\overline{R} = 155,48 \text{ k}\Omega.$$

Nous écrivons pour l'instant tous les chiffres. Il est possible que certains ne soient pas significatifs : l'étude de l'incertitude-type nous le dira ultérieurement.

L'écart-type des valeurs est :

$$\sigma = 1,20 \Omega.$$

MESURE ET INCERTITUDES • CHAP. 20

➔ Solution de l'exercice type (suite)

- 3 On en déduit l'incertitude-type en utilisant la formule :

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

avec $n = 10$ (le nombre de mesures).

On obtient :

$$u = \frac{1,20}{\sqrt{10}} = 0,38 \dots \approx 0,4 \, \Omega.$$

On ne garde qu'un chiffre significatif pour l'incertitude-type (c'est le chiffre des dixièmes) et on écrit alors :

$$R = (155,5 \pm 0,4) \, \Omega.$$

- 4 Intéressons-nous dans un premier temps à la valeur numérique supposée de la résistance. Le premier anneau correspond à un 1, le second à un 5 et le troisième à une multiplication par 10 k Ω , ce qui nous donne :

$$R = 15 \times 10 = 150 \, \text{k}\Omega.$$

La tolérance est (anneau doré) de $\pm 5\%$. Or 5% de 150 k Ω vaut 7,5 k Ω , donc la valeur réelle de la résistance doit être comprise entre :

$$150 - 7,5 = 142,5 \, \text{k}\Omega$$

et

$$150 + 7,5 = 157,5 \, \text{k}\Omega.$$

La valeur reportée à la réponse précédente est compatible avec ces limites.

- 5 La dispersion des valeurs mesurées par les élèves est due aux erreurs de mesure de leurs multimètres. Notons qu'il serait absurde de répondre ici que cela est lié à la tolérance sur la valeur de la résistance indiquée par le fabricant. Ici, les élèves ne mesurent *qu'une seule* résistance, qui a une valeur bien précise.

Voir énoncé page 319

COURS

INTERROS

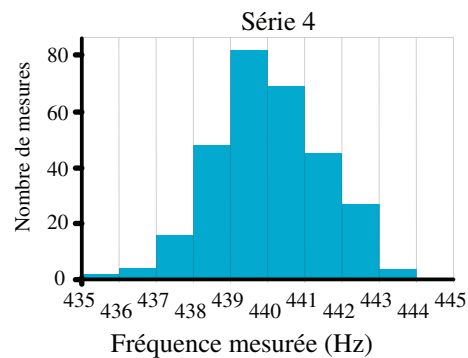
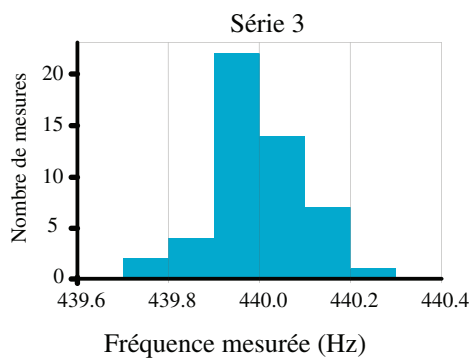
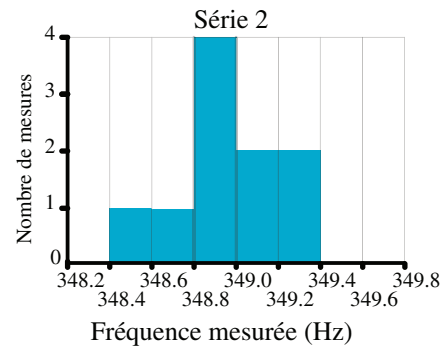
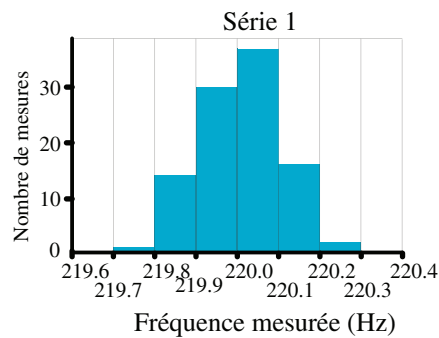
CORRIGÉS

1 **QCM** Testez vos connaissances

5 min

Corrigé
p. 331

- 1 La dispersion d'une série de mesures est caractérisée par :
☐ a La valeur moyenne ☐ b L'écart-type ☐ c L'incertitude-type
- 2 Plus une mesure est précise, plus la dispersion des valeurs mesurées est :
☐ a petite ☐ b grande
- 3 Quatre groupes d'élèves mesurent la température ambiante ϑ dans la salle de classe lors d'une séance de travaux pratiques. La moyenne des valeurs est $21,39\text{ }^{\circ}\text{C}$ et leur écart-type est de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Laquelle des écritures suivantes est correcte ?
☐ a $\vartheta = (21,39 \pm 0,6)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ☐ b $\vartheta = (0,6 \pm 21,4)\text{ }^{\circ}\text{C}$
☐ c $\vartheta = (21,4 \pm 0,3)$ ☐ d $\vartheta = (21,39 \pm 0,3)\text{ }^{\circ}\text{C}$
☐ e $\vartheta = (21,4 \pm 0,3)\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4 On considère les quatre histogrammes suivants, correspondant chacun à une série de mesures de la fréquence du son émis par un instrument de musique.



- (a) Sans faire de calcul, indiquer quelle série de mesures a la moyenne la plus petite.
- ☐ a La série 1 ☐ b la série 2 ☐ c la série 3 ☐ d la série 4

MESURE ET INCERTITUDES • CHAP. 20

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

(b) Sans faire de calcul, indiquer quelle série de mesures a l'écart-type le plus élevé.

☐ a La série 1 ☐ b la série 2 ☐ c la série 3 ☐ d la série 4

(c) Deux séries ont été effectuées en jouant la même note. Il s'agit des séries :

☐ a 1 et 2 ☐ b 2 et 3 ☐ c 3 et 4

(d) Les deux séries de la question précédente présentent une dispersion similaire des résultats de mesure.

☐ a Vrai ☐ b Faux

(e) La série pour laquelle on a effectué le plus de mesures est la série 2.

☐ a Vrai ☐ b Faux

2 Indice de réfraction d'un verre



15 min

Corrigé
p. 331

On souhaite identifier un type de verre en mesurant son indice de réfraction. On fait effectuer sept mesures indépendantes, qui donnent pour l'indice de réfraction n les résultats suivants :

1,67; 1,61; 1,61; 1,59; 1,65; 1,56; 1,68

On donne en outre une liste de différents types de verre, et la valeur de leur indice de réfraction.

Dénomination du verre	Indice de réfraction
BK7	1,5168
K5	1,5225
BaK50	1,5677
SK2	1,6074
SSK4	1,6177
LaK10	1,7200

- Quelle est la valeur moyenne des mesures ?
- Quel est l'écart-type des mesures ?
- Quelle est l'incertitude-type résultant de cette série de mesures ?
- Ces mesures sont-elles compatibles avec un ou plusieurs des verres de la table ci-dessus ? Si oui, lequel ou lesquels ?

3 Précision d'un GPS



20 min

Corrigé
p. 332

On considère deux capteurs GPS, que nous désignons par la suite par A et B. Chacun de ces capteurs mesure sa propre position (x, y) dans un plan horizontal. Pour simplifier le problème, nous nous intéressons uniquement à la statistique des mesures de x . Chacun des capteurs effectue une mesure toutes les $\Delta t = 0,5$ seconde. Le capteur A est immobile, tandis que le capteur B est animé d'un mouvement rectiligne uniforme le long de l'axe des x à la vitesse de 10 m.s^{-1} , et se trouve en $x = 0$ en $t = 0$.

Mesures du capteur A :

temps (s)	x (m)
0	9,1
0,5	30,0
1	22,8
1,5	4,9
2	14,2
2,5	36,5

Mesures du capteur B :

temps (s)	x (m)
0	1,4
0,5	2,7
1	3,3
1,5	26,6
2	12,7
2,5	21,3

- 1 En utilisant un outil numérique, déterminer l'écart-type des mesures du capteur B.
- 2 L'écart-type des mesures du capteur B donne-t-il une idée de la précision de ce capteur? Justifier, et proposer une méthode permettant d'évaluer la précision de ce capteur.
- 3 Pour améliorer la précision avec laquelle est donnée leur position, les capteurs calculent la moyenne de plusieurs mesures consécutives. Au bout de 3 secondes, quelle est l'incertitude-type sur la position du capteur A? Sur la position du capteur B?

MESURE ET INCERTITUDES • CHAP. 20

1 QCM Testez vos connaissances

Énoncé
p. 328

- 1 Réponse **b** : c'est l'écart-type.
- 2 Réponse **a** : plus la dispersion est petite.
- 3 Réponse **e**. On a $n = 4$ donc l'incertitude-type est $\frac{0,6}{\sqrt{4}} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$.
On doit donc garder l'expression de la valeur moyenne jusqu'au premier chiffre après la virgule. La réponse **c** est incorrecte car il manque l'unité.
- 4 (a) Réponse **a**. Un ordre de grandeur de la valeur moyenne de cette série, pour laquelle les mesures sont toutes comprises entre 219,7 Hz et 220,3 Hz, est de 220 Hz. En répétant le même raisonnement pour les autres séries, on voit qu'elles ont une valeur moyenne plus grande que celle de la série A.
(b) Réponse **d**. L'ordre de grandeur de la dispersion des mesures de cette série est manifestement supérieure à 1 Hz, alors que la dispersion des autres séries est inférieure à 1 Hz (la différence entre la valeur maximale et valeur minimale dans les séries 1 à 3 est au plus égale à 1 Hz).
(c) Réponse **c** : il s'agit des séries 3 et 4, qui ont toutes les deux une valeur moyenne de l'ordre de 440 Hz.
(d) Réponse **b** : faux. Comme on l'a vu précédemment la dispersion des résultats de la série 4 est largement supérieure à celle des autres séries.
(e) Réponse **b** : faux. En sommant toutes les valeurs des barres de l'histogramme de cette série, on obtient $1 + 1 + 4 + 2 + 2 = 10$ mesures. Dans chacun des autres histogrammes, il existe au moins une barre correspondant à plus de mesures. Ceci prouve que non seulement l'affirmation de l'énoncé est fautive, mais *a fortiori* que la série 2 est celle pour laquelle on a effectué le plus petit nombre de mesures.

2 Indice de réfraction d'un verre

Énoncé
p. 329

MÉTHODE

Pour résoudre cet exercice, vous pouvez utiliser un logiciel tableur ou le langage Python, comme expliqué dans le cours.

La valeur moyenne des mesures est

$$\bar{n} \approx 1,624.$$

COURS

INTERROS

CORRIGÉS

- 2 L'écart-type des mesures est

$$\sigma \approx 0,044.$$

- 3 L'incertitude-type résultant de cette série est par conséquent :

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{7}} \approx 0,017$$

- 4 Nous arrondissons l'incertitude-type de manière à n'avoir qu'un chiffre significatif :

$$u \approx 0,02$$

et nous gardons donc l'expression de $\bar{n}$ avec deux chiffres après la virgule :

$$\bar{n} \approx 1,62.$$

Nous pouvons en définitive écrire :

$$n = 1,62 \pm 0,02.$$

Cette valeur est compatible avec les verres SK2 et SSK4.

3 Précision d'un GPS

Énoncé
p. 330

- 1 Pour répondre à cette question, nous pouvons utiliser un logiciel tableur ou Python. Le format de ce livre étant plus adapté à cette dernière option, c'est celle que nous utilisons pour présenter la solution.



En Python

```
import numpy
x = [1.4, 2.7, 3.3, 26.6, 12.7, 21.3]
print( numpy.std(x,ddof=1) )
```

Ce programme affiche : « 10.6959182246 ».

L'écart-type des mesures du capteur B est alors :

$$\sigma_A \approx 11 \text{ m.s}^{-1}.$$

- 2 Les mesures du capteur B sont dispersées non seulement à cause de sa précision finie, mais aussi parce qu'il est en mouvement. L'écart-type des mesures du capteur B ne permet donc pas de donner une idée de la précision de ce capteur. On peut s'en convaincre en imaginant un capteur de très grande précision, pour lequel l'erreur de mesure est négligeable (très petite), qui aurait la même trajectoire que le capteur B. La liste de ses mesures successives à partir de $t = 0$ serait donc : 0, 5,0 m, 10,0 m, etc.

MESURE ET INCERTITUDES • CHAP. 20

L'écart-type de 6 mesures successives (comme pour les capteurs A et B) s'obtiendrait donc de la manière suivante :



En Python

```
import numpy
x = [0, 5, 10, 15, 20, 25, 30]
print( numpy.std(x,ddof=1) )
```

ce programme affiche : « 10.8012344973 ».

L'écart-type obtenu ($\sigma \approx 11 \text{ m.s}^{-1}$) n'est clairement pas lié à l'erreur de mesure, puisque celle-ci est par hypothèse négligeable, mais bien au mouvement du capteur.

Pour remédier à ce problème, on se place dans le référentiel lié au capteur B. Dans ce référentiel, en mouvement par rapport au capteur A, nous introduisons la coordonnée x' , mesurée par rapport à la position x_B du capteur B :

$$x' = x - x_B.$$

Par ailleurs, le capteur B étant animé d'un mouvement rectiligne uniforme à la vitesse $v = 10 \text{ m.s}^{-1}$, nous avons :

$$x_B = vt$$

donc en définitive :

$$x' = x - vt.$$

Nous pouvons donc écrire la table des mesures du capteur B dans son propre référentiel (voir tableau ci-contre).

L'écart-type de ces valeurs est :

$$\sigma_B \approx 7,0 \text{ m.}$$

temps (s)	x' (m)
0	1,4
0,5	-2,3
1	-6,7
1,5	11,6
2	-7,3
2,5	-3,7

- 3** Au bout d'un temps τ , les capteurs ont effectué n mesures, où n est donné par :

$$n = \frac{\tau}{\Delta t}.$$

Ici, nous avons $\tau = 3 \text{ s}$ et $\Delta t = 0,5 \text{ s}$, donc $n = 6$. L'incertitude-type sur la position du capteur A est alors :

$$u_A = \frac{\sigma_A}{\sqrt{6}} \approx 5 \text{ m,}$$

tandis que l'incertitude-type sur la position du capteur B est :

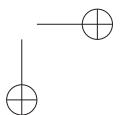
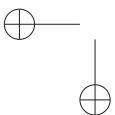
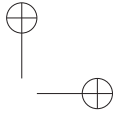
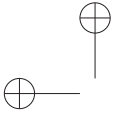
$$u_B = \frac{\sigma_B}{\sqrt{6}} \approx 3 \text{ m.}$$

Ce capteur est donc le plus précis des deux.

COURS

INTERROS

CORRIGÉS



Annexe A

Classification périodique

↑ colonnes ↓ périodes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	¹ H Hydrogène 1.0																	⁴ He Hélium 4.0
2	³ Li Lithium 6.9	⁹ Be Béryllium 9.0													¹⁴ N Azote 14.0	¹⁶ O Oxygène 16.0	¹⁹ F Fluor 19.0	²⁰ Ne Néon 20.2
3	²³ Na Sodium 23.0	²⁴ Mg Magnésium 24.3													³¹ P Phosphore 31.0	³² S Soufre 32.1	³⁵ Cl Chlore 35.5	⁴⁰ Ar Argon 39.9
4	³⁹ K Potassium 39.1	⁴⁰ Ca Calcium 40.1	⁴⁵ Sc Scandium 45.0	⁴⁸ Ti Titane 47.9	⁵¹ V Vanadium 50.9	⁵² Cr Chrome 52.0	⁵⁵ Mn Manganèse 54.9	⁵⁶ Fe Fer 55.8	⁵⁹ Co Cobalt 58.9	⁵⁸ Ni Nickel 58.7	⁶³ Cu Cuivre 63.5	⁶⁴ Zn Zinc 65.4	⁶⁹ Ga Gallium 69.7	⁷⁴ Ge Germanium 72.6	⁷⁵ As Arsenic 74.9	⁸⁰ Se Sélénium 79.0	⁷⁹ Br Brome 79.9	⁸⁴ Kr Krypton 83.8
5	⁸⁷ Rb Rubidium 85.5	⁸⁸ Sr Strontium 87.6	⁸⁹ Y Yttrium 88.9	⁹⁰ Zr Zirconium 91.2	⁹³ Nb Niobium 92.9	⁹⁸ Mo Molybdène 95.9	⁹⁸ Tc Technétium 98	¹⁰² Ru Ruthénium 101.1	¹⁰³ Rh Rhodium 102.9	¹⁰⁶ Pd Palladium 106.4	¹⁰⁷ Ag Argent 107.9	¹¹⁴ Cd Cadmium 112.4	¹¹⁵ In Indium 114.8	¹²⁰ Sn Étain 118.7	¹²¹ Sb Antimoine 121.8	¹³⁰ Te Tellure 127.6	¹²⁷ I Iode 126.9	¹²⁹ Xe Xénon 131.3
6	¹³³ Cs Césium 132.9	¹³⁸ Ba Baryum 137.3	L	¹⁸⁰ Hf Hafnium 178.5	¹⁸¹ Ta Tantale 180.9	¹⁸⁴ W Tungstène 183.8	¹⁸⁷ Re Rhenium 186.2	¹⁹² Os Osmium 190.2	¹⁹³ Ir Iridium 192.2	¹⁹⁵ Pt Platine 195.1	¹⁹⁷ Au Or 197.0	²⁰² Hg Mercure 200.6	²⁰⁵ Tl Thallium 204.4	²⁰⁸ Pb Plomb 207.2	²⁰⁹ Bi Bismuth 209.0	²¹⁰ Po Polonium (209)	²¹⁰ At Astate (210)	²²² Rn Radon (222)
7	²²³ Fr Francium (223)	²²⁶ Ra Radium (226)	A	²⁶¹ Rf Rutherfordium (261)	²⁶² Db Dubnium (262)	¹⁰⁶ Sg Seaborgium (266)	¹⁰⁷ Bh Bohrium (264)	¹⁰⁸ Hs Hassium (277)	¹⁰⁹ Mt Meitnerium (268)	¹¹⁰ Ds Darmstadtium (271)	¹¹¹ Rg Roentgenium (272)	¹¹⁵ Cn Copernicium (285)						

nombre de nucléons
Si l'élément a plusieurs isotopes,
on prend celui qui est le plus abondant
dans la nature.

symbole de l'élément

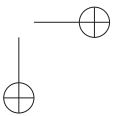
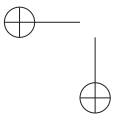
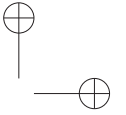
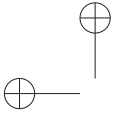
masse molaire atomique
de l'élément (g.mol⁻¹)

numéro atomique

L = Lanthanides : 57 à 71

A = Actinides : 89 à 103

138	¹³⁸ La Lanthane 138.9	141	¹⁴¹ Ce Cérium 140.1	142	¹⁴² Pr Praseodyme 140.9	146	¹⁴⁶ Nd Néodyme 144.2	152	¹⁵² Sm Samarium 150.4	153	¹⁵³ Eu Europium 152.0	159	¹⁵⁹ Gd Gadolinium 157.3	164	¹⁶⁴ Dy Dysprosium 162.5	165	¹⁶⁵ Ho Holmium 164.9	166	¹⁶⁶ Er Erbium 167.3	169	¹⁶⁹ Tm Thulium 168.9	174	¹⁷⁴ Yb Ytterbium 173.0	175	¹⁷⁵ Lu Lutétium 175.0
227	²²⁷ Ac Actinium (227)	232	²³² Th Thorium 232.0	231	²³¹ Pa Protactinium 231.0	237	²³⁷ Np Neptunium (237)	244	²⁴⁴ Pu Plutonium (244)	243	²⁴³ Am Américium (243)	247	²⁴⁷ Cm Curium (247)	251	²⁵¹ Cf Californium (251)	254	²⁵⁴ Es Einsteinium (252)	257	²⁵⁷ Fm Fermium (257)	259	²⁵⁹ Md Mendelevium (258)	269	²⁶⁹ No Nobelium (259)	261	²⁶¹ Lr Lawrencium (262)



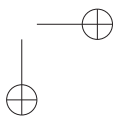
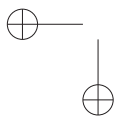
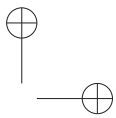
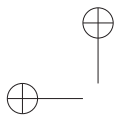
Annexe B

Index

alcalins, 220, 222
ampèremètre, 3, 32
ampoule à décanter, 295
anion, 218, 224
aspartame, 258
banc Kofler, 293
banc Kofler, 297
base de temps, 62
Bohr (modèle de), 211
branche, 2
calculatrice, 78
calibre, 3
capteur, 32
caractéristique, 30
cation, 218
centre optique, 117
charge électrique, 276
chromatographie, 289, 294
chronophotographie, 170, 173
classification périodique, 219
colorant, 289
combustion, 279
concentration, 256
 molaire, 255
condition d'équilibre, 165
conductance, 31
conducteur, 1
 ohmique, 30, 33
configuration électronique, 218, 233
courant, 2
covalente, 235
cristallin, 121
décantation, 295
décibel, 56
dioptré, 76, 77, 79
dipole, 29
dispersion, 85, 100
dissolution, 256
distance, 194
dynamomètre, 162, 167
écho, 55
électron, 210
entité élémentaire, 248
équation-bilan, 274, 278, 279, 281
équilibre, 167
état, 273
 final, 274
 initial, 274
excès, 276, 278, 282
fission, 311
focale, 118
force, 161, 162, 165, 167
 gravitationnelle, 189, 193
formule
 brute, 250
 de Lewis, 235, 239
foyer, 117
 image, 116
 objet, 117
fréquence, 52
fusion, 311
gaz
 noble, 220, 222
 rare, 220
glucose, 259
grandissement, 121

gravitation universelle, 188
halogènes, 220, 222
hélium, 309
hertz, 52
histogramme, 323
incertitude-type, 325
indice de réfraction, 76, 80
infrasons, 58
intensité, 3, 55
intensité de la pesanteur, 190, 192
interaction gravitationnelle, 187, 188, 191, 192, 194
isotope, 310
laser, 100
lentille, 114
 convergente, 114
liaison, 235, 274
loi d'Ohm, 31
loi des nœuds, 4
lois de Snell-Descartes
 réflexion, 77
 réfraction, 77
longueur d'onde, 100
lumière blanche, 82, 83, 100
lumière visible, 100
maille, 16
 loi des mailles, 18
masse, 163, 187, 189
Mendeleïev, 219, 335
microphone, 54
mobile autoporteur, 163, 171, 173
mole, 247
moyenne, 321
multimètre, 19, 32
neutron, 207, 210, 311
newton, 162
niveau sonore, 56
nœud, 2
nombre
 de masse, 208
normale, 77
noyau, 210
numéro atomique, 208
œil, 121
onde
 sonore, 54
 électromagnétique, 100
oscilloscope, 53, 62, 63
 à mémoire, 64
période, 52, 219, 222
photorésistance, 33
plan d'incidence, 77
poids, 165, 187, 189
précipité, 276
principe
 d'inertie, 161, 169
 de l'action-réaction, 165, 188
prisme, 83, 98, 106
produit, 274
proton, 207, 210, 311
quantité de matière, 247
radiation
 monochromatique, 100
 polychromatique, 100
radioactif, 311
raie, 104
rapport frontal, 294
rayon
 incident, 77
 réfléchi, 76, 77, 85
 réfracté, 76, 77, 85
réactif, 274

réaction chimique, 273
référentiel, 133, 134
 galiléen, 164
 géocentrique, 134
 héliocentrique, 134
 terrestre, 134
réflexion, 75, 77
réfraction, 75
rétine, 121
saccharose, 258
saturation, 256, 258
signal périodique, 52
Soleil, 102
soleil, 309, 312
soluté, 256
solution aqueuse, 256
solvant, 256
son, *voir* onde sonore
 aigu, 57
 grave, 57
spectre, 101
 d'émission, 104
spectroscopie, 104
stœchiométrie, 275, 279
symétrie sphérique, 189
système chimique, 273
tension, 17, 51
 corde, 166
 périodique, 53
 variable, 53, 63
thermistance, 33
timbre, 58
trajectoire, 133
transformation
 nucléaire, 310
transformation chimique, 273, 274, 278
ultrason, 64
ultrasons, 58
uniforme, 137
valence, 235
vitesse, 135
 du son, 55, 64, 65
 instantanée, 136
 moyenne, 136
voltmètre, 19, 32
écart-type, 322



Annexe C

Liste des vidéos

Chapitre	Titre	Page
Chapitre 1	Exercice 5 : loi des nœuds	8
Chapitre 2	Exercice 4 : additivité des tensions	24
Chapitre 3	Exercice 4 : conducteur ohmique	37
Chapitre 3	Exercice 9 : détecteur de fumée	39
Chapitre 3	Exercice 6 : utilisation du module Python polyfit ..	45
Chapitre 5	Exercice 10 : profondeur apparente d'une piscine ..	82
Chapitre 7	Exercice 5 : un cas particulier	125
Chapitre 8	Exercice 12 : au gré du vent	144
Chapitre 10	Exercice 9 : exoplanète CoRoT-7b	194
Chapitre 12	Cours : cortège électronique	217
Chapitre 12	Cours : classification périodique des éléments	219
Chapitre 17	Cours : réactions chimiques	273
Chapitre 18	Cours : identification chimiques courantes	291
Chapitre 18	Exercice 8 : suivi de synthèse	301