INTERROS des LYCÉES

Collection dirigée par Éric MAURETTE

enseignement scientifique



Damien IMBERT
Cécile MAMERT
Nathalie ROZÉ

Nathan

09157417_001.indd 1 06/08/2020 13:07

Remerciements

Les auteurs et l'équipe de Prepamath Editions tiennent à remercier Thomas Brisbout, Stéphane Bimbot, David Guénée et Clément Boulonne pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée à cet ouvrage.

Illustrations : Anna Michalak et Prisca Baverey

Coordination éditoriale : François Déliac

Conception couverture : Simon Geliot

Votre avis nous intéresse : contact@prepamath.fr

Retrouvez l'actualité scientifique et les Interros des Lycées sur :

Facebook : facebook.com/interrosdeslycees

Twitter : @prepamath

© PREPAMATH Éditions 2021
© Éditions NATHAN 2021 - ISBN 978209 157568 1

Avant-propos

La culture scientifique est aujourd'hui indispensable à tous et à toutes pour bien comprendre et maîtriser l'évolution de la société et de son environnement, ainsi que pour prendre des décisions en toute connaissance de cause. C'est pourquoi un enseignement scientifique commun est dispensé à tous les élèves de première et de terminale, ce qui constitue une des nouveautés de la réforme du Lycée et du Baccalauréat en cours.

Le programme d'enseignement scientifique est organisé en 4 grands thèmes :

- 1) Une longue histoire de la matière (chapitres 1 à 3),
- 2) Le Soleil, une source d'énergie (chapitres 4 à 7),
- 3) La Terre, un astre singulier (chapitres 8 à 10),
- 4) Son et musique, porteurs d'information (chapitres 11 à 14).

Cet ouvrage est conforme au programme entré en vigueur à la rentrée 2019. L'approche est volontairement pluridisciplinaire avec de la physique-chimie, des SVT et des mathématiques.

Pour vous aider à bien comprendre votre cours et à vous entraîner en travaillant des compétences variées, nous vous proposons :

- des rappels de cours imagés pour vous aider à retenir l'essentiel des notions,
- des points « étymologie » pour mémoriser les mots complexes,
- des QCM et vrai/faux pour vous tester rapidement,
- des exercices corrigés avec des difficultés croissantes et des durées variables.

Les exercices proposés visent à tester rapidement les différentes compétences du programme. Ils s'inspirent d'exercices déjà donnés avant la réforme et des sujets « zéros » proposés par l'Education Nationale.

Avec l'application « Nathan Live », vous pourrez aborder certains points du cours ou certains exercices de façon plus concrète grâce à des vidéos et d'autres ressources numériques.

N'hésitez pas à nous faire part de vos remarques ou suggestions pour les rééditions à l'adresse suivante : contact@prepamath.fr .

Bon entraînement !

Les auteurs

Table des matières

Première partie
UNE LONGUE HISTOIRE DE LA MATIÈRE

Chap 1 Un niveau d'organisation : les éléments chimiques 3
- Cours 3
- Interros 10
- Corrigés 22

Chap 2 Des édifices ordonnés : les cristaux 29
- Cours 29
- Interros 43
- Corrigés 52

Chap 3 Une structure complexe : la cellule vivante 63
- Cours 63
- Interros 72
- Corrigés 84

Deuxième partie
LE SOLEIL, UNE SOURCE D'ÉNERGIE

Chap 4 Le rayonnement solaire 95
- Cours 95
- Interros 101
- Corrigés 110

Chap 5 Le bilan radiatif terrestre 119
- Cours 119
- Interros 125
- Corrigés 132

Chap 6 Conversion biologique de l'énergie solaire par photosynthèse 141
- Cours 141
- Interros 148
- Corrigés 159

Chap 7 Le bilan thermique du corps humain 167
- Cours 167
- Interros 175
- Corrigés 182

Troisième partie
LA TERRE, UN ASTRE SINGULIER

Chap 8 La forme de la Terre 191
- Cours 191
- Interros 201
- Corrigés 207

Chap 9 L'histoire de l'âge de la Terre 213
- Cours 213
- Interros 219
- Corrigés 229

Chap 10 La Terre dans l'Univers 237
- Cours 237
- Interros 242
- Corrigés 250

Quatrième partie
SON ET MUSIQUE, PORTEURS D'INFORMATION

Chap 11 Le son, phénomène vibratoire 257
- Cours 257
- Interros 266
- Corrigés 272

Chap 12 La musique, ou l'art de faire entendre les nombres 277
- Cours 277
- Interros 283
- Corrigés 288

Chap 13 Le son, une information à coder 293
- Cours 293
- Interros 300
- Corrigés 306

Chap 14 Entendre la musique 311
- Cours 311
- Interros 318
- Corrigés 330

Cinquième partie
DEVOIR DE SYNTHÈSE ET ANNEXE

Chap 15 Devoir de synthèse 339
- Sujet 339
- Corrigé 351

Annexes
- Rappels mathématiques 359
- Classification périodique des éléments 365
- Liste des vidéos et références Internet 367
- Memo 369

Nathan Live

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

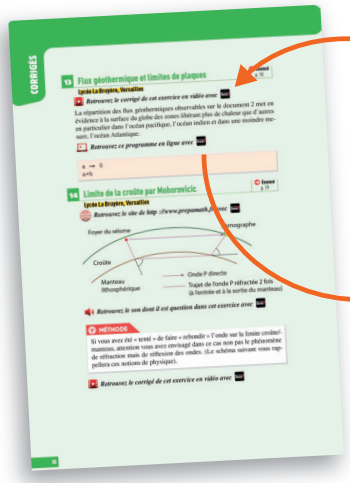


C'est facile !

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

Conseils de méthode

Conseils méthodologiques

Tous les conseils qui suivent sont utilisés par un grand nombre de majors des meilleures grandes écoles et sont recommandés par de nombreux professeurs, en plus de professionnels de l'organisation. Pour en savoir plus, nous vous recommandons la lecture du livre « comment travailler plus efficacement », par F. Déliac, U. Hadrien, E. Matrullo et E. Maurette, aux Editions Prepamath.

Faire des « feed-back »

Ce point est très important car il faut faire travailler sa mémoire activement et souvent. Le feed-back consiste à se demander systématiquement, sans ses notes, ce qu'on vient d'apprendre. Ce contrôle peut se faire mentalement, oralement ou par écrit. Ainsi :

- dans les transports, dans votre lit, en allant au lycée... Essayez de vous rappeler mentalement ce qui a été vu en cours, ou les exercices dans la journée. Cela revient à se demander ce qu'on a appris aujourd'hui. Cela permet de voir si on a été réellement attentif. (feed-back mental).
- Après avoir relu votre cours, essayez juste après de retrouver par écrit les idées essentielles du cours, ou des astuces, vues dans les exercices. Le mieux est cette fois de l'écrire, car les schémas sont à savoir refaire (feed-back écrit).
- Recommencez longtemps après avoir vu le cours, pour vérifier ce que vous avez réellement retenu. Cela permet de faire travailler plusieurs fois votre mémoire et ainsi, on peut espérer que les connaissances soient utiles en fin d'année pour l'épreuve finale (mémoire à long terme).
- Entre amis, expliquez la leçon que vous venez d'apprendre, qu'elle soit claire ou non. Si l'autre personne ne comprend pas, c'est que vous n'avez peut-être pas compris ou que vous n'êtes pas clair. Cela permet de voir si on sera précis le jour de l'évaluation. Au besoin, faites ceci avec des amis plus rigoureux que vous. Vous expliquez et ils vous corrigent. C'est profitable pour celui qui s'exprime et celui qui corrige.
- Faites-vous des fiches avec le plan du cours, les définitions essentielles, les schémas essentiels... Cela ne sert à rien de prendre les fiches d'une autre personne. Rédiger vous-mêmes vos fiches vous permettra de les retenir. Nous n'avons pas tous les mêmes difficultés.

Pour être efficace, il faut faire ce feed-back sans l'aide de vos notes, plusieurs fois dans l'année pour un même chapitre et, si possible, un long moment après pour faire travailler la mémoire à long terme.

Miser sur la qualité

- Ne lisez pas le cours passivement. Il faut repérer toutes les zones d'ombre, les entourer et poser des questions sur ce qu'on ne comprend pas, puis chercher des réponses auprès du professeur ou en lisant notre manuel. Il faut que tout soit bien compris, sans approximation, avant de faire des exercices.
- Après chaque exercice, faites un feed-back en mémorisant la démarche générale et en faisant des liens avec le cours. Il ne faut pas vous contenter de résoudre l'exercice, il faut en retirer des leçons.
- À la fin d'un problème, essayez de trouver un moyen de généraliser cet exercice ou de le compliquer comme le ferait un professeur ; trouver aussi ce que cela pourrait changer dans la solution.

Travailler par « couches successives »

- *Etape 1 :* survoler l'ensemble du cours au début, en ne retenant que la structure c'est-à-dire les grands titres, les noms des parties, les idées essentielles. . . . pour avoir une idée de l'esprit du chapitre.
- *Etape 2 :* reprendre le cours du début en retenant cette fois également les théorèmes et résultats importants, une fois qu'on sait où on doit aboutir.
- *Etape 3 :* reprendre son cours du début pour l'étudier en profondeur cette fois, en apprenant le détail des démonstrations par exemple.

Pour préparer les contrôles, il faut relire son cours avant de s'attaquer aux exercices. Il faut aussi revoir les exercices du cours et bien les maîtriser avant d'en faire d'autres.

Travailler sa rapidité

- Prenez l'habitude, en travaillant chez vous, de vous concentrer sur votre travail et pas sur autre chose (dans le calme, sans téléphone ou télévision à proximité, sans avoir faim, en oubliant ses problèmes...)
- Prenez l'habitude de travailler chez vous en temps limité pour faire les exercices. Le minutage de chacun des exercices de ce livre est fait en ce sens. Vous pourrez y réfléchir plus après, mais vous verrez ce dont vous êtes capable sur un laps de temps donné. C'est comme pour les sportifs, on ne s'entraîne pas juste le jour de la compétition ! Pour être rapide, il faut de l'entraînement !
- Imposez-vous des créneaux de travail sans déborder quelle que soit votre charge de travail, de façon concentrée. Le but est de travailler efficacement et pas à moitié concentré plus longtemps. Avec un œil sur la montre, cela vous forcera à devenir efficace. Ne négligez pas non plus vos heures de sommeil.

L'épreuve finale d'enseignement scientifique en classe de Première

Au cours du troisième trimestre, une épreuve écrite de 2h participera à l'obtention de votre baccalauréat dans le cadre du contrôle continu. Le sujet sera composé de 2 exercices de 10 points chacun, portant sur un ou deux thèmes du programme. Ils mêleront sciences physiques et chimiques, SVT, et mathématiques.

Les compétences à travailler

L'épreuve vise à évaluer vos compétences :

- exploiter des documents de nature variée,
- organiser/effectuer/contrôler des calculs,
- communiquer sous forme de tableau, schéma, graphique,
- rédiger une argumentation scientifique,
- avoir un esprit critique sur les outils, mesures ou valeurs utilisées.

Les exercices peuvent donc comporter une question ouverte, des schémas à réaliser, des argumentations, voire des QCM… mais aussi des calculs, avec ou sans calculatrice. Certaines questions vous demanderont un esprit critique sur les mesures et leur fiabilité. Il faudra donc être capable de prendre du recul sur les données, ce qui est loin d'être évident.

Quelques conseils pour l'écrit :

- lire rapidement l'ensemble du sujet avant de l'attaquer pas à pas, pour avoir une idée de l'esprit général,
- déterminer quelles questions vous semblent les plus faciles pour commencer par celles-ci,
- en analyse des documents, listez au brouillon les informations clés liées au problème, et les notions de cours à utiliser pour construire votre argumentation ;
- pour les exercices de synthèse, penser à faire une rapide introduction contenant une problématique, à faire des parties et/ou des paragraphes et n'oubliez pas la conclusion. On saute des lignes entre introduction et développement ainsi qu'entre la fin du développement et la conclusion ;
- pour les calculs, vérifier la cohérence des formules, s'il y a des unités ;
- pour les schémas, ne pas oublier le titre, la légende, l'organisation des légendes, une échelle de grandeur au besoin ;
- soigner la présentation, pensez au correcteur. On doit savoir quel exercice et quelle question vous traitez. Pensez à sauter des lignes pour aérer la copie ;
- garder un peu de temps pour relire votre copie et vérfier vos calculs.

Première partie

UNE LONGUE HISTOIRE DE LA MATIÈRE

Chapitre 1

Un niveau d'organisation : les éléments chimiques

Plan du chapitre

1. Introduction : la théorie du Big Bang
2. Les éléments chimiques dans l'Univers
3. Transformations nucléaires

1 Introduction : la théorie du Big Bang

L'histoire de l'Univers et de la matière s'appuie sur la théorie du Big Bang, explosion géante qui aurait eu lieu il y a plus de 13 milliards d'années. À cette époque, la matière telle que nous la connaissons n'existe pas encore. L'Univers est formé de particules élémentaires libres, condensées en un point extrêmement chaud. Au moment du Big Bang, l'Univers entre en expansion. Ses particules vont s'associer pour former des protons et des neutrons, à l'origine des éléments chimiques les plus simples : l'hydrogène, puis l'hélium. 100 millions d'année plus tard, lors de la formation des étoiles, des éléments chimiques plus lourds apparaissent, grâce à la fusion nucléaire.

2 Les éléments chimiques dans l'Univers

2.1 Représentation symbolique

Toute la matière connue dans l'Univers est constituée d'une centaine d'éléments chimiques différents.

Chacun de ces éléments chimiques est défini par le nombre de protons présents dans son noyau, par exemple :

- un élément contenant 1 proton dans son noyau est nommé hydrogène ;
- un élément contenant 8 protons dans son noyau est nommé oxygène ;
- un élément contenant 92 protons dans son noyau est nommé uranium.

COURS

Par convention, un élément chimique est noté : ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, avec :

- X : symbole de l'élément chimique,
- A : nombre de nucléons, c'est-à-dire le nombre de protons plus le nombre de neutrons, également, aussi appelé *nombre de masse*,
- Z : nombre de protons, aussi appelé *numéro atomique*.

Si N est le nombre de neutrons, on a :

$$N = A - Z.$$

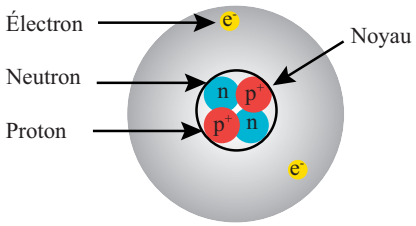


Figure 1.1 – Représentation d'un atome qui comporte 4 nucléons : 2 protons et 2 neutrons

Au XIXe siècle, le chimiste russe Mendeleïev a classé les éléments connus dans un tableau qui porte son nom (voir page 365).

2.2 Isotopes

Définition 1 : isotopes

Des éléments qui ont le même nombre de protons, mais pas le même nombre de neutrons sont des *isotopes*.

Exemples :

- L'atome d'hydrogène le plus répandu est ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, qui possède un proton et n'a aucun neutron. Cependant, il existe d'autres configurations possibles pour l'hydrogène :
  ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$, qui possède un proton et un neutron, nommé deutérium, noté ${}^{2}\mathrm{H}$;
  ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$, qui possède un proton et deux neutrons, nommé tritium, noté ${}^{3}\mathrm{H}$.

  On dit que le deutérium et le tritium sont des isotopes de l'hydrogène.
- L'élément carbone possède 6 protons. Il existe sous forme de carbone 12 (${}^{12}_{6}\mathrm{C}$) qui est la forme la plus présente dans la nature, mais aussi de carbone 13 (${}^{13}_{6}\mathrm{C}$) et de carbone 14 (${}^{14}_{6}\mathrm{C}$).
  ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ et ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ sont des isotopes. ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ et ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ sont stables, tandis que ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ est instable. Sa présence dans un échantillon de matière organique morte permet de dater la mort de celle-ci.

  Voir exercice 1 page 339.

2.3 Abondance des éléments chimiques

Dans un environnement donné, tous les éléments ne sont pas présents partout dans les mêmes proportions : certains sont plus abondants que d'autres.

Définition 2 : abondance

L'*abondance* d'un élément chimique dans un environnement donné est la proportion de cet élément par rapport aux autres éléments.

L'abondance d'un élément chimique peut se mesurer par rapport au nombre d'atomes, à la masse, ou au nombre de molécules.

Exemples :

- *Dans l'Univers*, les deux éléments les plus abondants sont l'hydrogène (90 % des atomes) et l'hélium (9 % des atomes). Le tableau suivant donne l'abondance des 6 éléments chimiques les plus présents dans l'Univers, en % d'atomes.

Élément	Hydrogène	Hélium	Oxygène	Carbone	Néon	Azote
Symbole	H	He	O	C	Ne	N
Abondance (% d'atomes)	90	9	0,1	0,060	0,012	0,010

- *Sur Terre*, les éléments les plus abondants sont l'oxygène, le fer, le silicium et le magnésium.

Élément	Oxygène	Manganèse	Fer	Silicium	Soufre	Hydrogène
Symbole	O	Mg	Fe	Si	S	H
Abondance (% d'atomes)	49	17	14	14	3,7	0,2

- *Les êtres vivants* sont constitués principalement d'eau (H_2O) et de molécules organiques (principalement à base de carbone et d'hydrogène).

Élément	Hydrogène	Oxygène	Carbone	Azote
Symbole	H	O	C	N
Abondance (% d'atomes)	53	39	6,5	0,5

COURS

Ces données peuvent être représentées sous forme de diagrammes en bâtons.

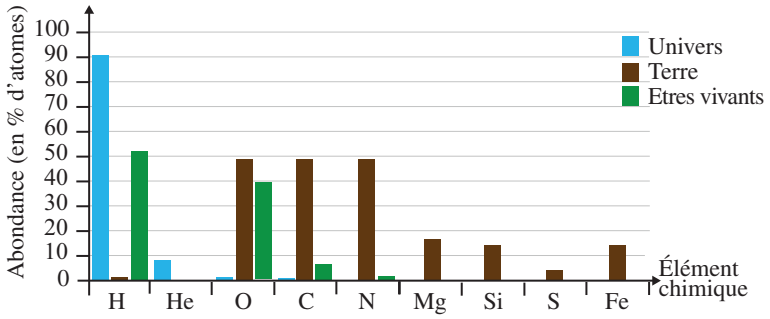


Figure 1.2 – Représentation de l'abondance des éléments chimiques par un diagramme en bâtons

Une autre représentation graphique intéressante est le diagramme circulaire, ou "camembert".

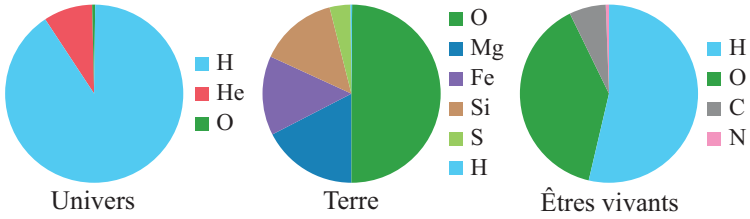


Figure 1.3 – Diagrammes circulaires

Voir exercices 3 page 11 et 4 page 12.

3 Transformations nucléaires

Les transformations nucléaires sont des réactions qui vont *modifier la structure du noyau* et qui vont donc permettre de transformer un élément chimique en un autre.

3.1 Fusion

Les noyaux d'hydrogène, qui se sont formés quelques secondes après le Big Bang, sont les principaux constituants des étoiles, et donc de l'Univers.

En réagissant entre eux, ces noyaux légers vont pouvoir former des noyaux plus lourds grâce à une réaction nucléaire appelée *fusion*.

Définition 3 : fusion nucléaire

La *fusion nucléaire* est une réaction où deux noyaux légers s'associent pour former un noyau plus gros, en dégageant une grande quantité d'énergie.

Exemple
La réaction de fusion entre un noyau de deutérium ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ et un noyau de tritium ${}^{3}_{1}\mathrm{H}$ peut être représentée par l'équation suivante :

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Comme pour chaque transformation, des règles de conservation sont respectées. Dans le cas des réactions nucléaires, il y a conservation du nombre de masse et conservation de la charge électrique, qui correspond ici au nombre de protons.

C'est la fusion nucléaire au sein des étoiles qui permet de produire des noyaux de plus en plus lourds à partir de noyaux légers.

Ce phénomène est appelé *nucléosynthèse stellaire*. Ainsi, la fusion est à l'origine de la diversité des éléments chimiques de l'Univers.

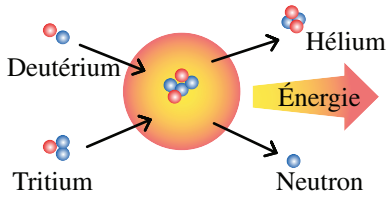


Figure 1.4 – Fusion du deutérium et du tritium

3.2 La fission

À l'inverse, il est possible que sous l'action d'un neutron, un noyau lourd instable se casse en plusieurs noyaux plus légers : on parle alors de *fission*.

Définition 4 : fission nucléaire

La *fission nucléaire* est une réaction où un gros noyau instable se sépare en deux noyaux sous l'action d'un neutron, en libérant des neutrons et une grande quantité d'énergie.

Exemple
La réaction de fission de l'uranium peut être représentée par l'équation suivante :

$$ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{139}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 3{}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

Voir schéma page suivante.

COURS

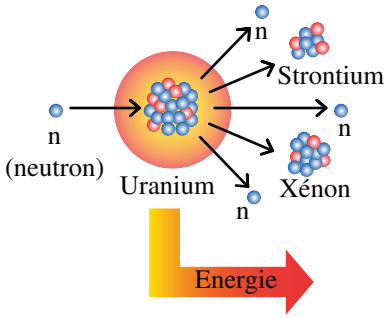


Figure 1.5 – Réaction de fission de l'uranium

- Conservation du nombre de masse, A : $1 + 235 = 236$ et $139 + 94 + 3 = 236$.
- Conservation de la charge électrique, et donc ici du nombre de protons, Z : $0 + 92 = 92$ et $54 + 38 + 3 \times 0 = 92$.

Ce type de réaction peut entraîner des réactions « en chaîne ». En effet, les trois neutrons produits sont capables à leur tour de provoquer la fission de trois nouveaux noyaux d'uranium.

Remarque : ce type de réaction est utilisé dans les centrales nucléaires actuelles.

3.3 La radioactivité

Définition 5 : radioactivité

La *radioactivité* est le phénomène physique par lequel des noyaux atomiques instables se transforment spontanément en d'autres noyaux de nature différente, tout en émettant simultanément des particules de matière ou des rayonnements.

Exemple : le radium 226 se désintègre en radon 222 en libérant une particule α, qui est un noyau d'hélium, c'est-à-dire une particule composée uniquement de 2 protons et 2 neutrons (mais sans électron).

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^{4}_{2}\text{He}$$

L'instant où un noyau radioactif va se désintégrer est imprévisible et complètement aléatoire. Cependant, les scientifiques se sont aperçus qu'on pouvait déterminer la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux d'un échantillon s'était désintégrée et l'ont nommée *temps de demi-vie*. Elle est caractéristique de l'élément radioactif étudié. La diminution du nombre de noyaux d'un échantillon est représentée par une courbe dite de *décroissance radioactive*. Celle-ci permet de déterminer la proportion de noyaux restants, ou la durée de radioactivité d'un échantillon.

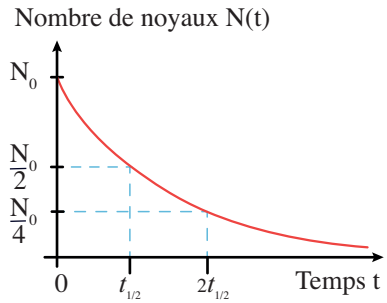


Figure 1.6 – Décroissance radioactive

La décroissance radioactive est donc à l'origine de la *datation radiométrique*.

Définition 6 : demi-vie d'un noyau radioactif

La *demi-vie* d'un échantillon de noyaux radioactifs est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon se désintègrent. On la note $t_{1/2}$.

Voir exercices 5 page 14 et 8 page 20.

À RETENIR

- Les éléments chimiques sont des entités caractérisées par un même nombre de protons. On en connaît une centaine dans l'Univers.
- La matière connue dans l'Univers est constituée principalement d'hydrogène et d'hélium.
- La fusion est une réaction nucléaire où deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.
- Les réactions nucléaires de fusion au sein des étoiles sont à l'origine de la centaine d'éléments chimiques connus dans l'Univers.
- La fission est une réaction nucléaire où un noyau lourd instable se scinde en deux noyaux plus légers, sous l'impact d'un neutron.
- La radioactivité est la désintégration spontanée d'un noyau instable qui permet de former un nouveau noyau plus stable, tout en libérant des particules de matière ou des rayonnements.
- Un élément radioactif est caractérisé par sa demi-vie, qui est le temps nécessaire pour diviser par deux le nombre de noyaux initialement présents dans un échantillon de cet élément.

INTERROS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 22

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$:

- **a** représente le symbole d'un atome ;
- **b** Z est le nombre de protons ;
- **c** A est le nombre de neutrons ;
- **d** A est le nombre de nucléons ;
- **e** représente le symbole d'un noyau.

2 Le nombre de masse A :

- **a** est le nombre de protons contenus dans un noyau ;
- **b** est le nombre de nucléons contenus dans un noyau ;
- **c** se conserve au cours d'une réaction nucléaire.

3 Le nombre de neutrons N :

- **a** est toujours égal au nombre de protons ;
- **b** peut être obtenu en réalisant le calcul $A - Z$;
- **c** peut être obtenu en réalisant le calcul $A + Z$.

4 On appelle abondance relative :

- **a** le nombre d'éléments chimiques dans l'Univers ;
- **b** le nombre d'isotopes dans une étoile ;
- **c** la proportion des éléments chimiques dans la matière.

2 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 22

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 Une réaction de fusion :

- **a** utilise une ressource énergétique renouvelable ;
- **b** est une réaction provoquée par l'impact d'un neutron ;
- **c** donne un noyau plus gros lorsque deux petits noyaux légers s'associent.

2 ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

- **a** est une réaction de fission ;
- **b** est une réaction de fusion ;
- **c** est une réaction chimique ;
- **d** vérifie la conservation du nombre de masse A.

3 $^{1}_{0}\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{85}_{35}\text{Br} + ^{148}_{57}\text{La} + 3\ ^{1}_{0}n$

- **a** est une réaction de fission ;
- **b** est une réaction de fusion ;
- **c** est une réaction chimique ;
- **d** vérifie la conservation du nombre de protons Z.

4 La demi-vie d'un échantillon est :

- **a** la moitié du temps de désintégration radioactive ;
- **b** la durée nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux initialement présents ;
- **c** un temps qui est indépendant des sources radioactives.

3 Atmosphère terrestre

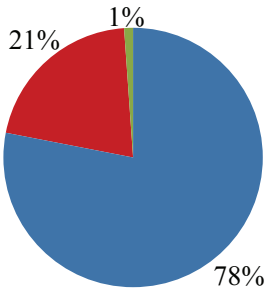
★ — 15 min — Corrigé p. 22

Lycée Carnot, Paris

L'atmosphère est une enveloppe de gaz qui entoure un corps. Dans le cas de la Terre, la basse atmosphère est constituée d'air, un mélange indispensable à la vie.

Voici l'abondance des éléments chimiques dans l'atmosphère terrestre :

élément	symbole	Abondance, %
Hydrogène	$^{1}_{1}\text{H}$	1,9
Oxygène	$^{16}_{8}\text{O}$	21,4
Azote	$^{14}_{7}\text{N}$	76,1
Autres	—	0,6



Composition de l'air

- Diazote
- Dioxygène
- Argon et autres dont CO_2

1 Donner le nombre de protons de l'oxygène.

2 Rappeler le gaz indispensable à la vie.

3 Relever l'élément chimique le plus abondant.

4 Tracer le diagramme circulaire de l'abondance de l'atmosphère terrestre.

Aide : le disque représente 100 % soit un angle de 360°.

5 Expliquer la valeur de l'abondance de l'hydrogène alors qu'il n'apparaît pas dans la composition de l'air.

INTERROS

4 Sur Terre

★ 25 min Corrigé p. 23

Lycée Saint-Esprit, Beauvais

Document 1 : Abondance relative des éléments chimiques (% d'atomes)

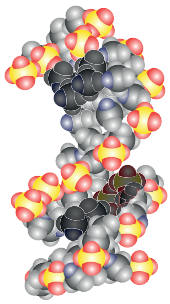
Retrouvez une vidéo sur l'utilisation de ce tableur avec Sciences live

	Croûte terrestre	Eau de mer	Corps humain	végétaux
H	0,22	66	61	47,9
He	—	—	—	—
O	47	33	24,1	21,9
C	0,19	0,0014	12,6	27,9
Ne	—	—	—	—
N	—	—	1,4	1,1
Mg	2,2	0,033	0,008	0,13
Si	28	—	—	—
Fe	4,5	—	—	—
S	—	0,017	0,05	0,1
Al	8	—	—	—
Ca	3,5	0,006	0,24	0,25
Na	2,5	0,28	0,03	—
Ti	0,46	—	—	—
P	—	—	0,25	0,1
K	—	0,006	0,06	0,5
Cl	—	0,33	0,03	—

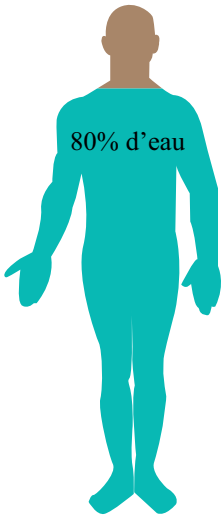
Document 2 : Matière organique

C'est la matière fabriquée par les êtres vivants. Elle est constituée de molécules regroupant majoritairement des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.

L'extrait de molécule d'ADN figurant ci-contre en est un exemple.

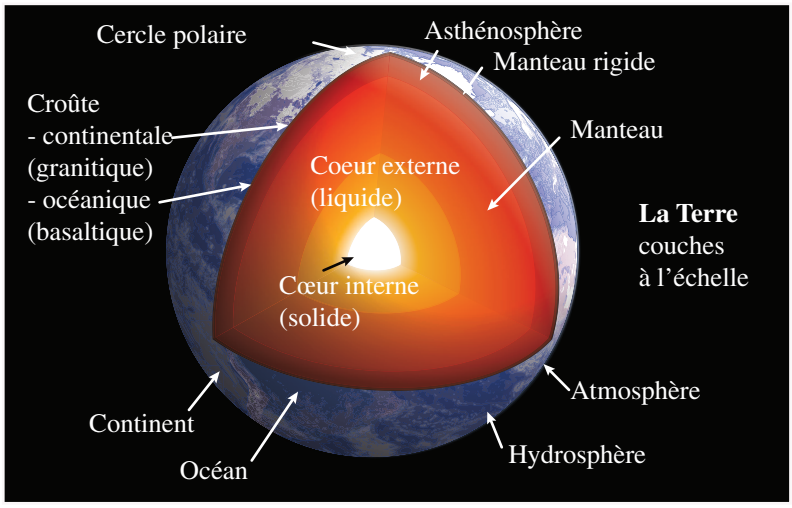


Document 3 : Composition en eau du corps



Document 4 : Composition de la Terre

La Terre est une planète vivante, dont on estime l'âge à 4,5 milliards d'années, mais les plus vieilles roches connues ont moins de 4 milliards d'années. Sa surface est occupée par 70,9 % de mers et seulement 29,1 % par les cinq continents. Le globe terrestre est constitué de trois zones : l'écorce (croûte continentale + croûte océanique), le manteau et le noyau. La croûte continentale est constituée principalement de granite.



INTERROS

1. À l'aide d'un tableur, tracer sur un même diagramme en barres, l'abondance en fonction de chaque élément chimique pour la croûte terrestre, l'eau de mer, le corps humain et les végétaux.
2. Relever l'élément le plus abondant de la croûte terrestre.
3. Relever l'élément le plus abondant de l'eau de mer.
4. Montrer que les mers sont constituées d'eau salée.
5. Expliquer la provenance du carbone dans l'abondance relative des éléments chimiques du corps humain.
6. En comparant les abondances du corps humain et des végétaux, déterminer quelles sont les principales molécules qui constituent les végétaux.

5 Radioactivité du phosphore 32

★★ 25 min Corrigé p. 24

Lycée du Parc, Lyon

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec live!

Le phosphore 32 est un radioélément artificiel, utilisé en médecine comme marqueur radioactif. Son numéro atomique est 15 et son symbole est P.

À l'instant $t = 0$, un échantillon de phosphore possède $N_0 = 1{,}00 \times 10^{22}$ noyaux. Tous les 5 jours, le nombre de noyaux restants est déterminé.

Les valeurs sont données dans le tableau ci-dessous.

Temps (en jours)	Nombre de noyaux
0	$1{,}003\,13.10^{22}$
5	$7{,}812\,41.10^{21}$
10	$6{,}084\,31.10^{21}$
15	$4{,}738\,46.10^{21}$
20	$3{,}802\,71.10^{21}$
25	$2{,}932\,08.10^{21}$
30	$2{,}449\,08.10^{21}$
35	$1{,}796\,27.10^{21}$
40	$1{,}456\,03.10^{21}$
45	$1{,}133\,96.10^{21}$

Période radioactive de quelques éléments radioactifs :

Noyau radioactif	Période radioactive
Phosphore 32	14,3 jours
Phosphore 33	25,3 jours
cobalt 60	5,2 ans
tritium	12,2 ans
césium 137	30 ans

1. Écrire le symbole du noyau de phosphore 32.
2. Déterminer la constitution du noyau de phosphore 32.
3. À l'aide d'un tableur, tracer le graphique représentant le nombre de noyaux de phosphore en fonction du temps.
4. Nommer le graphique obtenu.
5. En déterminant graphiquement la demi-vie, vérifier qu'il s'agit bien d'une source de phosphore 32.
6. Calculer le nombre de noyaux restants au bout de trois demi-vies.
7. Estimer la durée nécessaire pour obtenir 10 % de noyaux de phosphore.

6 Chauffage nucléaire

★★ 25 min Corrigé p. 25

D'après le BAC ES-L 2015 Centres Etrangers Afrique

Document 1 : Et si on testait le chauffage nucléaire...

« *Le constat de départ est celui d'un formidable gaspillage. Sur l'énergie libérée par la fission des atomes dans un réacteur nucléaire, un tiers seulement est aujourd'hui récupéré en énergie électrique. Les deux tiers restants se perdent dans la nature, la chaleur non utilisée étant évacuée dans l'air ou dans les fleuves et les océans bordant les centrales. Ainsi, l'énergie thermique perdue représente le double de l'énergie électrique produite. "Le gisement de chaleur produite dans les centrales est énorme. Au lieu d'en rejeter la plus grande partie en pure perte, on pourrait l'exploiter, en cogénération, pour le chauffage urbain ou l'industrie et vite subvenir à la moitié de la consommation de la France en chauffage" assure Henri Safa du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Il y faudrait un investissement de l'ordre de 20 milliards d'euros, mais le gain réalisé sur les achats d'hydrocarbures qui alimentent aujourd'hui les réseaux de chaleur serait d'environ 10 milliards d'euros par an. À terme, cela procurerait aux utilisateurs un chauffage "à très bas prix", tout en contribuant à "la décarbonisation*

INTERROS

de l'économie". Reste à savoir comment le public accueillerait la perspective de se chauffer à l'atome. Charlotte Mijeon, porte-parole du réseau Sortir du nucléaire, y voit une hérésie. "Les risques inhérents au nucléaire resteraient entiers, à commencer par la production de déchets radioactifs et la pollution provoquée par l'extraction de l'uranium", dit-elle. »

D'après un article de Pierre le Hir
publié dans Le Monde *le 30 octobre 2013.*

Document 2 : Exemples d'équations de réactions nucléaires

(1) ${}_{1}^{3}\mathrm{H} + {}_{1}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + {}_{0}^{1}\mathrm{n}$

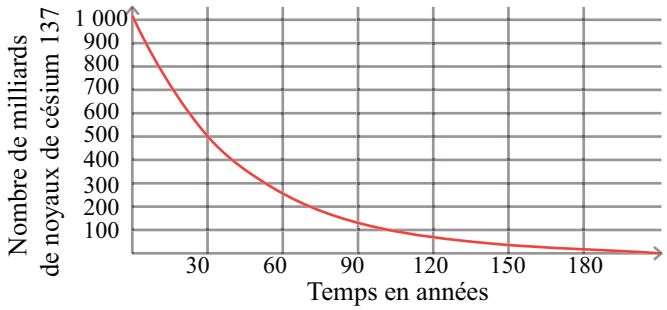
(2) ${}_{92}^{235}\mathrm{U} + {}_{0}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}_{36}^{92}\mathrm{Kr} + {}_{56}^{141}\mathrm{Ba} + 3\ {}_{0}^{1}\mathrm{n}$

(3) ${}_{92}^{239}\mathrm{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\mathrm{Np} + {}_{-1}^{0}\mathrm{e}$

(4) ${}_{54}^{140}\mathrm{Xe} + {}_{38}^{94}\mathrm{Sr} + 2\ {}_{0}^{1}\mathrm{n} \rightarrow {}_{92}^{235}\mathrm{U} + {}_{0}^{1}\mathrm{n}$

Document 3

Le césium 137 est l'un des principaux déchets radioactifs produits par les centrales nucléaires. Sa courbe de décroissance radioactive est donnée ci-dessous.



1 Attribuer à chaque réaction nucléaire du document 2, son type de transformation
(fusion, fission, désintégration).

2 Choisissez, dans le document 2, l'équation de la réaction nucléaire à l'origine de la production d'énergie dans une centrale nucléaire.

3 Relever le nombre de noyaux de césium initialement présents au départ.

4 Déterminer graphiquement la demi-vie du césium 137 d'après le document 3.

7 Déchets radioactifs

★★ 25 min Corrigé p. 26

Extrait Bac Antilles – Bac ES 2014, partie 2

Document 1 : Iode et radioactivité

Un accident nucléaire peut s'accompagner de la formation d'iode 131 (noté $^{131}_{53}\text{I}$), radioactif.

Il provient de la réaction de fission de l'uranium 235 (noté $^{235}_{92}\text{U}$) indiquée ci-dessous :

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{131}_{53}\text{I} + ^{99}_{39}\text{Y} + 6\ ^{1}_{0}\text{n}$$

Cet iode radioactif pénètre dans le sang par les voies respiratoires, par la peau ou par l'absorption d'aliments contaminés. En effet, la glande thyroïde, un organe régulateur très important dans notre organisme, accumule indifféremment l'iode radioactif ou l'iode ordinaire (noté $^{127}_{53}\text{I}$) jusqu'à saturation. L'irradiation prolongée de cet organe augmente donc le risque de cancer et d'autres affections de la thyroïde. Ce sont les fœtus, les bébés et les jeunes enfants qui courent le plus grand risque.

Prendre des comprimés d'iode ordinaire en cas d'accident nucléaire permet d'empêcher le corps d'accumuler de l'iode radioactif. De la même façon qu'une éponge gorgée d'eau claire n'absorbe pas d'eau polluée, la glande thyroïde saturée d'iode ordinaire n'accumule pas d'iode radioactif. Les particules radioactives sont alors tout simplement éliminées par l'urine et les selles.

Document 2 : Les applications de la radioactivité, quels déchets ?

Toute activité humaine produit des déchets. L'utilisation des propriétés de la radioactivité dans de nombreux secteurs engendre chaque année des déchets radioactifs. Ces déchets émettent de la radioactivité et présentent des risques pour l'Homme et l'environnement. Ces déchets proviennent pour l'essentiel des centrales nucléaires, des usines de traitement des combustibles usés ainsi que des autres installations nucléaires civiles et militaires qui se sont développées au cours des dernières décennies.

On compte également plus de 1 000 petits producteurs qui contribuent aussi, à un degré moindre, à la production de déchets radioactifs : laboratoires de recherche, hôpitaux, industries... Les déchets radioactifs sont variés. Leurs caractéristiques diffèrent d'un déchet à l'autre : nature physique et chimique, niveau et type de radioactivité, durée de vie (ou période radioactive)...

En France, les déchets radioactifs sont classés en fonction de leur mode de gestion, comme le montre le tableau qui suit :

		PÉRIODE RADIOACTIVE		
		Vie très courte (période < 100 jours)	Vie courte (période ⩽ 31 ans)	Vie longue (période > 31 ans)
ACTIVITÉ MASSIQUE*	Très faible activité TFA (< 100 Bq/g)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis évacuation dans les filières conventionnelles	Stockage de surface (Centre Industriel de Regroupement, d'Entreposage et de Stockage – CIRES)	
	Faible activité FA (< 10^5 Bq/g)		Stockage de surface (centre de stockage de l'Aube)	Stockage de faible profondeur (à l'étude)
	Moyenne activité MA (< 10^6 Bq/g)			Stockage réversible profond (à l'étude)
	Haute activité HA (> 10^6 Bq/g)		Stockage réversible profond (à l'étude)	

* L'activité massique est l'activité radioactive rapportée à 1 g d'échantillon.

D'après https://www.andra.fr

Document 3 : Activité et période radioactive

L'activité massique, notée A, d'un échantillon de matière radioactive est définie par le nombre de désintégrations par seconde et par gramme ; elle se mesure en becquerel par gramme (Bq/g).

Certains éléments fortement radioactifs ont une activité massique de l'ordre de plusieurs milliards de milliards de becquerels par gramme. D'autres ont une faible activité massique, de l'ordre de quelques dizaines de becquerels par gramme. Les éléments radioactifs sont appelés *radionucléides*.

On appelle période radioactive le temps au bout duquel la moitié de la quantité d'un même radionucléide aura naturellement disparu par désintégration ; l'activité est donc divisée par deux au bout d'une période radioactive.

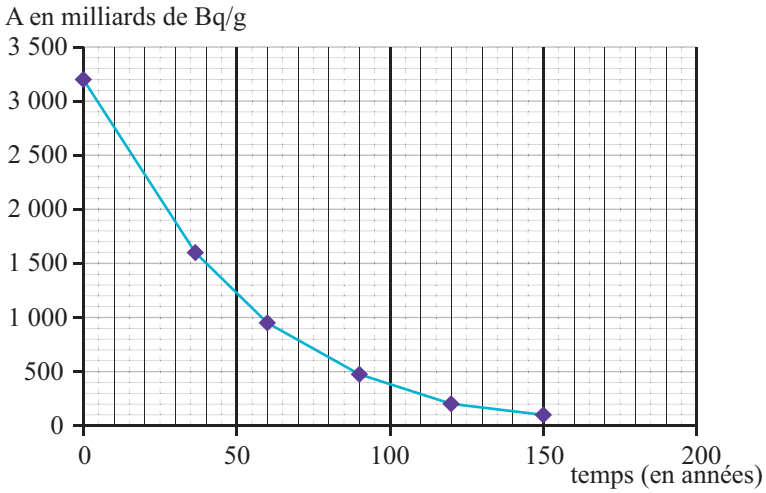
Données :

- Activités massiques de quelques éléments présents dans les déchets d'une centrale nucléaire (voir tableau page suivante) :

RADIOÉLÉMENT	PÉRIODE	ACTIVITÉ MASSIQUE
Iode 131	8 jours	4,6 millions de milliards de Bq/g
Césium 137	...	3 200 milliards de Bq/g
Plutonium 239	24 000 ans	2,3 milliards de Bq/g
Uranium 235	704 millions d'années	8 000 Bq/g

D'après https://www.andra.fr

- Évolution de l'activité massique A du césium 137 en fonction du temps.



1 **(a)** En France, la classification des déchets radioactifs repose sur deux paramètres. En utilisant le document 2, identifier ces deux paramètres.

(b) En utilisant les documents, expliquer comment, en France, on gère les déchets radioactifs tels que l'uranium 235.

2 Dans une centrale nucléaire, sous le choc d'un neutron, un noyau d'uranium 235 ($^{235}_{92}$U) peut se casser en un noyau de césium 140 ($^{140}_{55}$Cs) et un noyau de rubidium 93 ($^{93}_{37}$Rb). Il se forme aussi 3 neutrons selon la réaction :

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{140}_{55}\text{Cs} + ^{93}_{37}\text{Rb} + 3\ ^{1}_{0}\text{n}.$$

Cette réaction est : (choisir uniquement la réponse exacte)

[a] une réaction de combustion ; [b] une réaction de fission ;
[c] un changement d'état ; [d] une réaction de fusion.

3 On s'intéresse maintenant au césium 137 ($^{137}_{55}$Cs) qui est aussi un des produits formés lors de la fission de l'uranium 235.

(a) On veut déterminer la période radioactive du césium 137. Sur le graphique fourni dans les données, faire apparaître le tracé permettant de déterminer la période radioactive du césium 137. Noter sa valeur.

(b) Dans le cas du césium 137, déterminer l'activité massique restante à l'échelle d'une vie humaine. En déduire le problème environnemental posé.

4 Comme indiqué dans le document 1, l'iode radioactif 131 provient de la réaction de fission de l'uranium 235.

(a) Il existe à la fois l'iode 127 ($^{127}_{53}$I) non radioactif et l'iode 131 ($^{131}_{53}$I) radioactif. Ces noyaux ont le même numéro atomique. Nommer de tels noyaux.

(b) Connaissant le numéro atomique de l'uranium et celui de l'yttrium, expliquer comment on peut retrouver le numéro atomique de l'iode à partir de l'équation du document 1.

8 L'âge de la Lune par datation radioactive ★★★ 25 min Corrigé p. 27

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le potassium $^{40}_{19}$K est radioactif ; il se désintègre pour donner de l'argon $^{40}_{18}$Ar.

Pour déterminer l'âge des cailloux lunaires rapportés par les astronautes d'Apollo XI, on a mesuré les quantités relatives de potassium 40 (radioactif) et de son produit de décomposition, l'argon 40, qui est en général retenu par la roche. Un échantillon contenait $4{,}1 \times 10^{-3}$ mL d'argon 40 gazeux et $8{,}3 \times 10^{-7}$ g de potassium 40.

Le volume molaire dans les conditions de la mesure est de 22,4 L/mol et une mole contient $\mathcal{N}_A = 6{,}02 \times 10^{23}$ entités chimiques. Le potassium a une masse molaire de 40 g/mol.

1 Calculer les quantités (en mol) d'argon et de potassium contenues dans l'échantillon rapporté.

2 En déduire le nombre de noyaux de chaque élément.

3 Déterminer le nombre de noyaux de potassium contenu dans l'échantillon, au moment de la formation de la roche, sachant qu'il n'y avait alors aucune trace d'argon.

4 Proposer une méthode permettant de calculer l'âge de ces cailloux sachant que la demi-vie du potassium 40 est $T_{1/2} = 1{,}3 \times 10^9$ ans (voir aide à la page suivante).

Aide au calcul : $N(t) = \dfrac{N(0)}{2^n}$, où n est le nombre de périodes radioactives qui sont écoulées.

n	$\dfrac{1}{2^n}$
3	$1{,}25.10^{-1}$
3,1	$1{,}17.10^{-1}$
3,2	$1{,}09.10^{-1}$
3,3	$1{,}02.10^{-1}$
3,4	$9{,}47.10^{-2}$
3,5	$8{,}84.10^{-2}$

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 10

1 Réponses [b], [d] et [e].

2 Réponses [b] et [c]. Il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge lors d'une transformation nucléaire.

3 Réponse [b].

4 Réponse [c].

2 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 10

1 Réponses [a] et [c]. Une réaction de fusion peut utiliser une ressource énergétique renouvelable par exemple lorsqu'elle se produit entre deux isotopes de l'atome d'hydrogène. Elle donne un noyau plus gros lorsque deux petits noyaux légers s'associent.

2 Réponses [b] et [d]. C'est une réaction de fusion (donc réaction nucléaire) puisque deux noyaux légers donnent un noyau plus lourd. Au cours d'une réaction nucléaire, le nombre de masse A est conservé.

3 Réponses [a] et [d]. Réaction sous l'impact d'un neutron, c'est donc une réaction de fission.

4 Réponse [b].

3 Atmosphère terrestre

Enoncé p. 11

Lycée Carnot, Paris

1 D'après le symbole de l'oxygène dans le tableau, l'oxygène possède 8 protons.

2 Le gaz indispensable à la vie est le dioxygène, O_2.

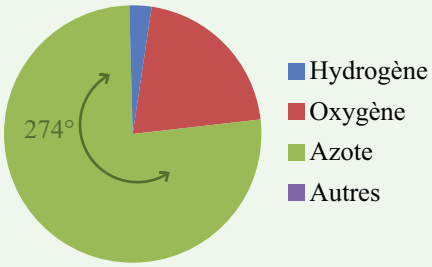
3 L'azote est l'élément le plus abondant, il se trouve sous la forme de la molécule de diazote, N_2.

4 Calcul pour déterminer l'angle représentatif de l'hydrogène :

$$\frac{1{,}9 \times 360°}{100} = 7°.$$

élément	Abondance, %	Angle, arrondi au °
Hydrogène	1,9	7
Oxygène	21,4	77
Azote	76,1	274
Autres	0,6	2

Abondance de l'atmosphère terrestre, %



MÉTHODE

- Tracer un cercle.
- À l'aide d'un rapporteur, placer l'angle de 274° représentant l'azote puis placer l'oxygène à la suite, de même pour l'hydrogène. Le reste représentant les autres éléments chimiques.
- Mettre un titre et une légende.

5 L'atmosphère terrestre contient de la vapeur d'eau, H_2O donc l'hydrogène est présent dans cette molécule et représente 1,9 % des éléments chimiques de l'atmosphère terrestre.

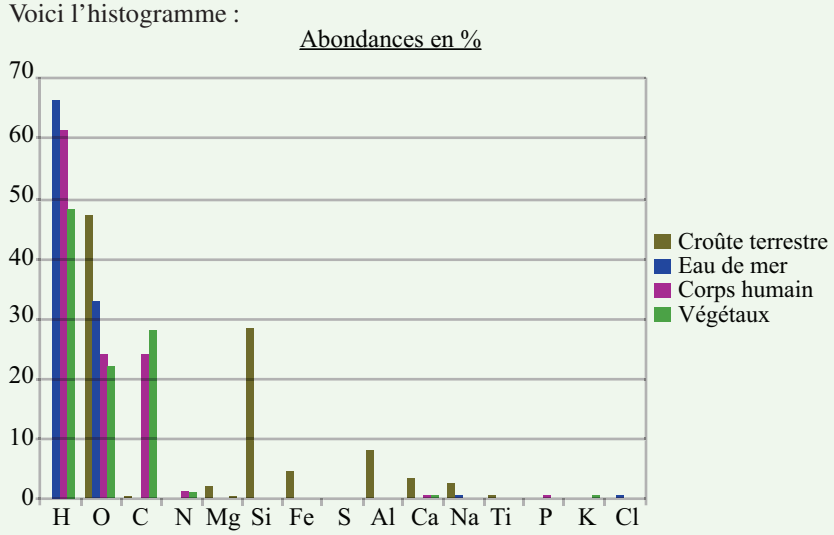
4 Sur Terre

Enoncé p. 12

Lycée Saint-Esprit, Beauvais

Retrouvez une vidéo sur l'utilisation de ce tableur avec live

1 Voici l'histogramme :



2 La croûte terrestre est constituée majoritairement d'oxygène.

3 L'eau de mer est constituée majoritairement d'hydrogène.

4 Dans l'eau de mer, il y a principalement de l'hydrogène et de l'oxygène formant les molécules d'eau. Puis les autres éléments les plus abondants sont le sodium et le chlore formant le chlorure de sodium, appelé communément le sel.

5 Le corps humain est un être vivant, donc il est constitué de matière organique. Ce sont ces molécules qui contiennent du carbone.

6 Dans les végétaux, la proportion d'hydrogène est quasiment le double de l'oxygène donc les végétaux sont constitués essentiellement d'eau. Comme pour le corps humain, le carbone forme la matière organique.

5 Radioactivité du phosphore 32

Enoncé p. 14

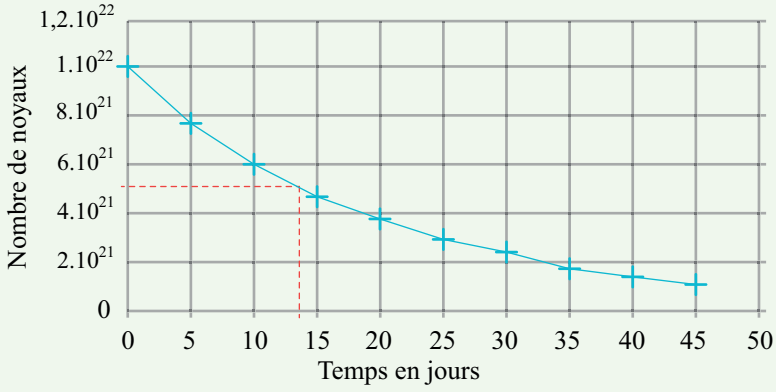
Lycée du Parc, Lyon

Retrouvez le corrigé de cet exercice en vidéo avec live!

1 Symbole du phosphore 32 : $^{32}_{15}\text{P}$.

2 Le noyau du phosphore contient 15 protons. Comme il a en tout 32 nucléons, il contient donc $32 - 15 = 17$ neutrons.

3 À partir des données fournies par le tableau, on obtient le graphique suivant :



4 Cette courbe représente une décroissance radioactive.

5 $N_0 = 10^{22}$ donc au bout d'une demi-vie, il restera 5×10^{21} noyaux. D'après le graphique, il faut 14 jours pour désintégrer la moitié du phosphore, ce qui correspond bien à la période radioactive du phosphore 32.

6 Au bout de $t_{1/2}$, N_0 est divisé par 2. Pour $2t_{1/2}$, N_0 est divisé par 4. Donc pour $3t_{1/2}$, N_0 est divisé par 8. De façon générale, $N(t) = \dfrac{N_0}{2^n}$, où n est le nombre de périodes radioactives.

Donc :

$$N = \frac{10^{22}}{2^3} = 1{,}25 \times 10^{21} \text{ noyaux.}$$

Il reste donc $1{,}25 \times 10^{21}$ noyaux au bout de 3 demi-vies.

7 Il reste 10 % du nombre initial de noyaux quand :

$$N = \frac{10}{100} \times 10^{22} = 10^{21} \text{ noyaux.}$$

Au bout de 3 demi-vies, soit 43 jours, il reste : $1{,}25 \times 10^{21}$ noyaux.

Au bout de 4 demi-vies, soit 57 jours, il reste :

$$N = \frac{10^{22}}{2^4} = 6{,}25 \times 10^{20} \text{ noyaux.}$$

Donc il faut une cinquantaine de jours pour qu'il ne reste que 10 % du nombre initial de noyaux de phosphore.

6 Chauffage nucléaire

Enoncé p. 15

D'après le BAC ES-L 2015 Centres Etrangers Afrique

1 Dans les équations (1) et (4), deux noyaux s'associent pour former un noyau plus lourd. Ce sont donc des réactions de fusion nucléaire.

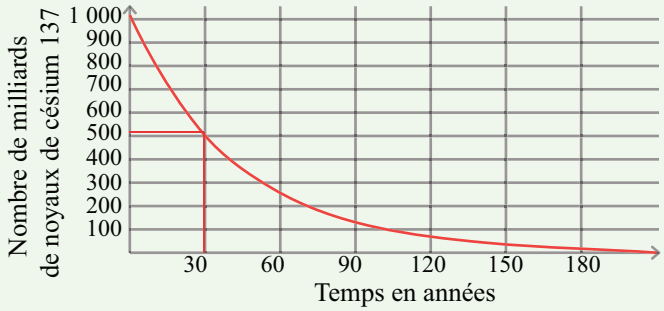
Dans (2), un noyau se scinde en deux sous l'effet d'un neutron. Il s'agit d'une réaction de fission nucléaire.

Dans (3), un noyau se désintègre spontanément pour former un nouveau noyau avec émission d'un électron. C'est donc une désintégration.

2 Dans un cœur nucléaire, un noyau d'uranium se divise sous l'effet d'un neutron. C'est donc l'équation (2).

3 Le nombre initial de noyaux de césium 137 est de 1 000 milliards de noyaux.

4 On atteint 500 milliards de noyaux au bout de 30 ans. Donc la demi-vie du césium 137 est de 30 ans (voir graphique page suivante).



CORRIGÉS

7 Déchets radioactifs

Enoncé p. 17

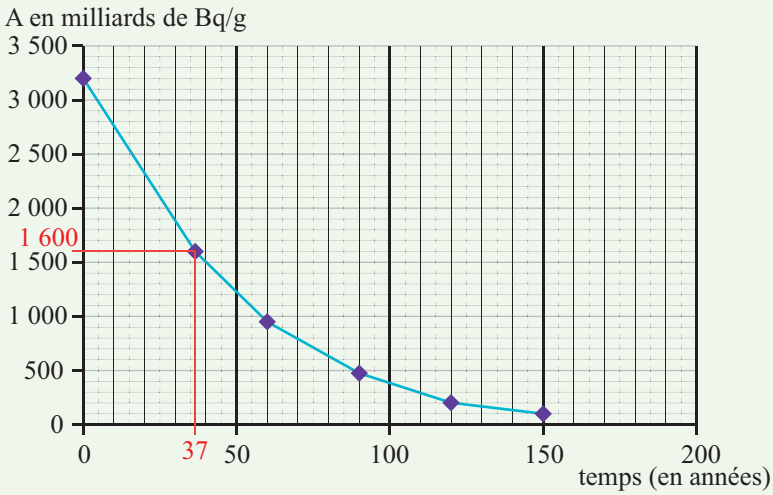
Extrait Bac Antilles – Bac ES 2014, partie 2

1 **(a)** La classification des déchets radioactifs repose sur la période radioactive et l'activité massique.

(b) L'uranium 235 a une période longue et une faible activité.
Il nécessite donc un stockage à faible profondeur.

2 Cette réaction est une réaction de fission. Réponse **b**.

3 **(a)** On se place à une activité de $3\,200 \div 2 = 1\,600$ milliards de Bq/g et on lit directement $T_{1/2} = 37$ ans.



(b) Au bout de 80 à 100 ans, l'activité massique est de 400 à 500 milliards de Bq/g.
D'après le tableau du document 2, c'est un déchet à haute activité, mais à période radioactive courte, il nécessite donc un stockage réversible profond.

4 **(a)** L'iode 127 et l'iode 131 sont des isotopes car ils ont le même numéro atomique Z mais un nombre de masse A différent.

(b) Au cours d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de charges soit : $92 + 0 = Z + 39 + 0$ donc :

$$Z = 92 - 39 = 53.$$

8 L'âge de la Lune par datation radioactive

Enoncé p. 20

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 Le volume molaire d'un gaz définit qu'une mole de gaz occupe 22,4 L or nous avons $4{,}1 \times 10^{-3}$ mL d'argon donc :

$$n_{Ar}(t) = \frac{4{,}1 \times 10^{-3}\left(10^{-3}\text{ L}\right)}{22{,}4\text{ L/mol}} = 1{,}8 \times 10^{-7}\text{ mol.}$$

Le potassium a une masse molaire de 40 g/mol donc :

$$n_K(t) = \frac{8{,}3 \times 10^{-7}\text{ g}}{40\text{ g/mol}} = 2{,}07 \times 10^{-8}\text{ mol.}$$

2 Le nombre de noyaux est calculé avec la formule $N = n \times \mathcal{N}_A$.

$$\begin{aligned} N_{Ar}(t) &= n_{Ar}(t) \times \mathcal{N}_A \\ &= 1{,}8 \times 10^{-7}\text{ mol} \times 6{,}02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1} \\ &= 1{,}08 \times 10^{17}\text{ noyaux.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_K(t) &= n_K(t) \times \mathcal{N}_A \\ &= 2{,}07 \times 10^{-8}\text{ mol} \times 6{,}02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1} \\ &= 1{,}25 \times 10^{16}\text{ noyaux.} \end{aligned}$$

3 À l'instant $t = 0$, il n'y avait pas d'argon donc le nombre de noyaux de cet élément vient de la désintégration du potassium présent dans la roche. Donc :

$$\begin{aligned} N_K(0) &= N_K(t) + N_{Ar}(t) \\ &= 1{,}25 \times 10^{16} + 1{,}08 \times 10^{17} = 1{,}2 \times 10^{17}\text{ noyaux.} \end{aligned}$$

4 On sait que $N(t) = \dfrac{N(0)}{2^n}$ donc :

$$\frac{N_K(t)}{N_K(0)} = \frac{1}{2^n}.$$

Or, $\dfrac{N_K(t)}{N_K(0)} = \dfrac{1{,}25 \times 10^{16}}{1{,}2 \times 10^{17}} = 1{,}04 \times 10^{-1}$.

Ainsi,

$$\frac{1}{2^n} \approx 1{,}04 \times 10^{-1} \quad \text{quand} \quad n = 3{,}3.$$

Il s'est donc écoulé $\Delta t = n \times t_{1/2} = 3{,}3 \times 1{,}3 \times 10^9$ ans = $4{,}3.10^9$ ans.

Chapitre 2

Des édifices ordonnés : les cristaux

Plan du chapitre

1. Introduction
2. L'état solide
3. Le modèle du cristal parfait
4. Un exemple de cristal ionique : le chlorure de sodium
5. Les cristaux qui nous entourent

1 Introduction

La matière peut s'organiser en structures régulières : les *cristaux*. Ils sont omniprésents dans notre environnement et peuvent composer certaines structures de notre corps. L'organisation structurale d'un matériau et ses propriétés physiques sont en lien avec l'organisation microscopique des éléments chimiques qui le composent.

PROBLÉMATIQUE

En quoi l'étude microscopique de l'organisation des éléments chimiques au sein d'un solide peut-elle nous permettre de mieux comprendre sa structure macroscopique ?

2 L'état solide

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques de l'état solide ?

À l'échelle microscopique, la matière existe sous trois états physiques : liquide, gazeux et solide, qui présentent chacun des propriétés spécifiques. Ces propriétés s'expliquent par l'organisation des entités chimiques (atomes, ions, molécules) à l'échelle microscopique :

- dans un gaz, les entités chimiques sont libres de mouvement et s'entrechoquent ;
- dans un liquide, elles se déplacent peu et sont liées les unes aux autres ;

COURS

- dans un solide, elles vibrent autour d'un emplacement, ce qui explique la rigidité de la matière.

On peut distinguer deux types de solides selon leur organisation :

- les *solides amorphes* dans lesquels les entités chimiques sont désordonnées (ex : le verre) ;
- les *solides cristallins* dont les atomes ou groupes d'atomes sont organisés avec un arrangement spatial périodique.

3 Le modèle du cristal parfait

PROBLÉMATIQUE

Quelles sont les caractéristiques d'un cristal parfait ?

Un cristal est une matière solide caractérisée par une structure spatiale périodique, et défini par un motif élémentaire symétrique qui se répète dans l'espace, appelé *maille*. Dans le cadre d'un cristal parfait, on peut le décrire géométriquement à l'aide de deux notions : *le réseau et le motif*.

- On appelle *réseau* un ensemble de points équivalents de l'espace appelés nœuds. La notion de réseau ne doit pas être confondue avec la notion de cristal. Il s'agit d'une notion abstraite purement mathématique alors que le cristal est un objet physique.
- On appelle *motif* la plus petite entité discernable qui se répète périodiquement par translation : en pratique un atome ou un groupe d'atomes.

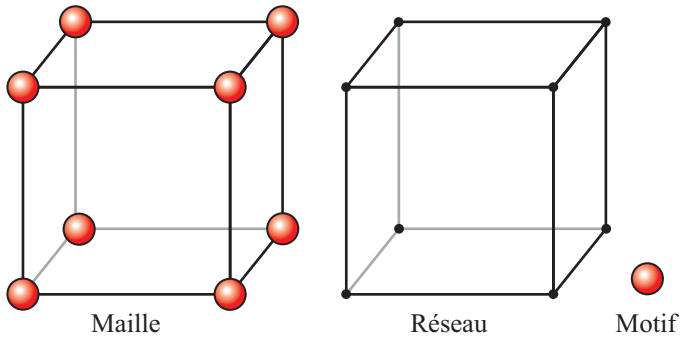
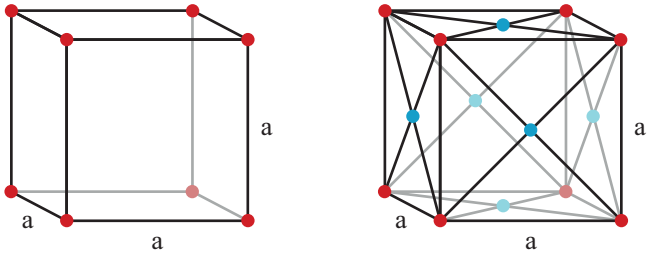


Figure 2.1 – Dans cet exemple, la maille est un cube

Dans *une maille cubique simple*, les entités chimiques sont situées aux sommets du cube alors que dans une *maille cubique à faces centrées*, les entités chimiques sont situées aux sommets du cube et au centre de chaque face de ce cube. Le

paramètre de maille a correspond à la longueur de l'arête de la maille cubique (on l'exprime généralement en picomètres : 1 pm = 10^{-12} m).



Cubique simple (cs) — Cubique faces centrées (cfc)

Figure 2.2 – Représentation cubique simple (à gauche) et cubique faces centrées CFC (à droite)

La structure d'un cristal parfait est donc décrite par son réseau cristallin et son motif.

3.1 Étude du réseau cubique simple

L'exemple du réseau cubique simple permet de définir certaines notions. On prend l'exemple du polonium qui est le seul élément cristallisant suivant une maille de type réseau cubique simple :

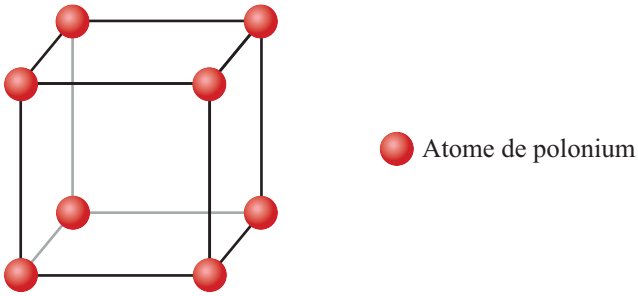


Figure 2.3 – Représentation cubique simple d'une maille du cristal de polonium

Motif : le motif est un atome de polonium. Par simplicité, on choisit l'origine du réseau de façon à ce que chaque nœud coïncide avec le centre d'un atome de polonium.

Modèle des sphères dures : les atomes de la maille sont assimilés à des sphères dures, c'est à dire des sphères indéformables de rayon R et situées les unes au contact des autres. Les atomes plus proches voisins sont appelés tangents. Cependant, par commodité de lecture, on les représente espacés.

COURS

Multiplicité : la *multiplicité* N (parfois appelée Z) correspond au nombre de motifs par maille. Dans ce modèle, la multiplicité correspond donc au nombre d'atomes par maille. Selon la place de l'atome dans la maille, on peut définir le nombre de mailles qui se partagent l'atome et donc la contribution de l'atome à la maille :

Place d'un atome dans la maille	Au centre 	Sur une face 	Sur une arête 	Sur un sommet 
Nombre de mailles qui se partagent l'atome	1	2	4	8
Contribution de l'atome à la maille	1	1/2	1/4	1/8

Tableau 2.1 – La multiplicité d'une maille

Dans le réseau cubique simple proposé, les atomes sont situés aux 8 sommets d'un cube (la maille). Chaque atome au sommet du cube ne compte donc que pour 1/8 car il est partagé entre 8 cubes adjacents. La multiplicité est donc :

$$N = 8 \text{ atomes} \times \frac{1}{8} = 1 \text{ atome.}$$

Une maille est dite *primitive* lorsque $N = 1$, sinon elle est dite *multiple*.

Compacité : la compacité C d'un cristal est le volume relatif occupé par les atomes du motif dans la maille :

$$C = \frac{N \times V_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}$$

où N est la multiplicité de la maille, V_{motif} est le volume du motif et V_{maille} le volume de la maille.

Calcul du polonium (cubique simple) :

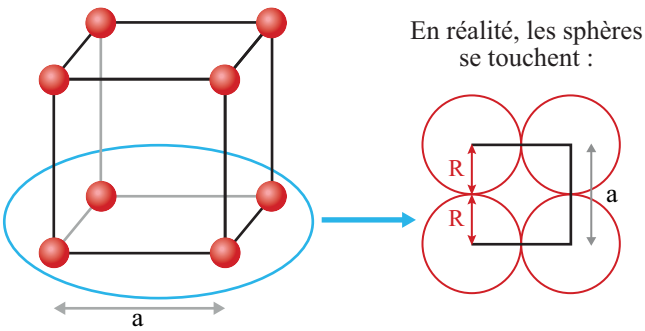


Figure 2.4 – Réseau cubique simple et paramètre de maille

Dans ce modèle, le paramètre de maille a vaut $a = 2 \times R$.

En se plaçant dans le cadre du modèle des sphères dures tangentes et en connaissant le volume d'un cube et d'une sphère, on a :

$$V_{\text{maille}} = a^3 \quad \text{et} \quad V_{\text{motif}} = \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Donc en appliquant la formule de la compacité (en remplaçant a par $2R$), on a :

$$C = \frac{1 \times \frac{4}{3} \times \pi \times R^3}{(2R)^3}$$

soit :

$$C = \frac{1}{8R^3} \times \frac{4\pi R^3}{3} = \frac{\pi}{6} \approx 0{,}52.$$

Masse volumique : la masse volumique ρ du cristal est définie par :

$$\rho = \frac{N \times m_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}.$$

En considérant que $m_{\text{motif}} = \dfrac{M}{\mathcal{N}_A}$ et que $V_{\text{maille}} = a^3$, on a :

$$\rho = \frac{N \times M}{\mathcal{N}_A \times a^3}$$

avec :

N : multiplicité ;

m_{motif} : masse d'un motif (lorsque la masse n'est pas donnée, on utilise la relation entre la masse molaire et la constante d'Avogadro) ;

V_{maille} : volume d'une maille (ici a^3) ;

M : masse molaire atomique de l'entité ;

$\mathcal{N}_A = 6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1} (constante d'Avogadro).

Dans le cas du polonium (réseau cubique simple), on a : $N = 1$; $M = 209$ g.mol^{-1} ; $a = 335{,}8$ pm. On trouve :

$$\rho = 9{,}17 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}.$$

Voir exercices 3 page 45 et 5 page 46.

3.2 Étude du réseau cristallin cubique faces centrées

Le réseau cristallin cubique faces centrées de paramètre de maille a (arête du cube) et dont les atomes sont des sphères de rayon R est représenté page suivante :

COURS

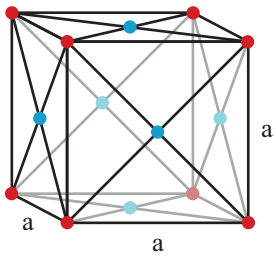


Figure 2.5 – Représentation cubique faces centrées. 8 atomes sont situés aux sommets du cube et 6 atomes au centre de chaque face

Multiplicité : dans cette représentation, 8 atomes sont répartis aux sommets de chaque face et sont partagés avec 8 mailles voisines (donc chaque atome compte pour 1/8), donc $N = 8 \times \frac{1}{8} = 1$.

Par ailleurs, 6 atomes sont répartis au milieu des faces, partagés avec 2 mailles voisines (donc chaque atome compte pour $1/2$), donc $N = 6 \times \frac{1}{2} = 3$.

Donc au total il y a 4 atomes par maille.

Compacité et paramètre de maille : pour calculer le paramètre de maille (arête du cube), on utilise le théorème de Pythagore :

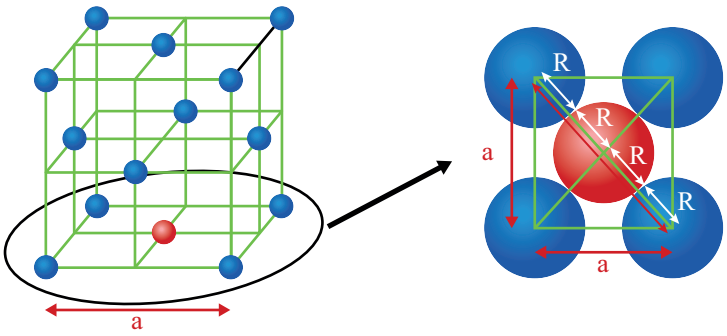


Figure 2.6 – Réseau cubique faces centrées et paramètre de maille

Dans le triangle rectangle schématisé et en appliquant le théorème de Pythagore, on a : $a^2 + a^2 = (4R)^2$, soit $2a^2 = (4R)^2$.

En mettant tout à la racine, on a : $\sqrt{2} \times a = 4R$ soit : $a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$.

Compacité : pour calculer la compacité, il nous faut déterminer le volume de la maille et du motif.

Le volume de la maille est toujours le volume d'un cube d'arête a,

donc : $V_{\text{maille}} = a^3$.

Le volume du motif est toujours le volume d'une sphère de rayon R. Nous avons vu que le paramètre de maille dans un réseau cubique à faces centrées est $a = \dfrac{4R}{\sqrt{2}}$.

On a donc : $C = \dfrac{4 \times \left(\frac{4}{3} \cdot \pi R^3\right)}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} = \dfrac{\pi\sqrt{2}}{6} \approx 0{,}74.$

Masse volumique

La masse volumique du réseau C.F.C. étant de 4, sa masse volumique est :

$\rho = \dfrac{4 \times M}{\mathcal{N}_A \times a^3}$, M étant la masse volumique de l'atome et $\mathcal{N}_A$ la constante d'Avogadro.

En prenant l'exemple d'une maille de fer :

$$M_{\text{Fe}} = 55{,}9 \text{ g.mol}^{-1} \text{ et } a = 364{,}8 \text{ pm},$$

on obtient : $\rho_{\text{Fe}} = 7{,}68.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

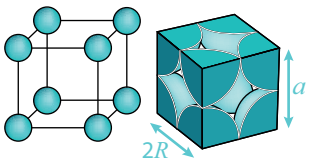
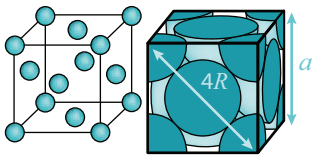
	Cubique simple (C.S.)	Cubique faces centrées (C.F.C.)
Représentation	 Représentation éclatée puis compacte du réseau C.S.	 Représentation éclatée puis compacte du réseau C.F.C.
Nombre d'atomes par maille (multiplicité)	8 atomes répartis aux sommets : $N = 8 \times 1/8 = 1$	8 atomes répartis aux sommets : $N = 8 \times 1/8 = 1$. 6 atomes répartis sur les faces : $N = 6 \times 1/2 = 3$. Donc il y a 4 atomes par maille
Compacité	Paramètre de maille : $a = 2R$. 52 % de la maille est occupée	Paramètre de maille : $a = \dfrac{4R}{\sqrt{2}}$. 74 % de la maille est occupée
Masse volumique	$\rho = \dfrac{M(X)}{\mathcal{N}_A \times a^3}$	$\rho = \dfrac{4 \times M(X)}{\mathcal{N}_A \times a^3}$

Tableau 2.2 – Caractéristiques des réseaux C.S. et C.F.C.

Retrouvez l'organisation de réseaux cristallins en vidéo avec live

Voir exercice 4 page 45.

COURS

4 Un exemple de cristal ionique : le chlorure de sodium

PROBLÉMATIQUE

Quelle est l'organisation cristalline du chlorure de sodium ?

Un cristal ionique est un assemblage électriquement neutre de cations et d'anions. La liaison ionique résulte de l'interaction électrostatique attractive entre les cations et les anions du cristal.

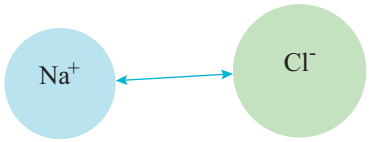


Figure 2.7 – Représentation des interactions entre les ions sodium et chlorure

Le chlorure de sodium (sel de table) est un solide ionique. Il est constitué d'ions chlorure (Cl^-) et d'ions sodium (Na^+) qui subissent une interaction attractive électrostatique (une charge positive est attirée par une charge négative).

Les charges de même signe se repoussant, les ions de charges opposées vont s'alterner, donnant lieu à la structure cristalline.

Réseau / Maille : Le chlorure de sodium est un réseau cubique à faces centrées.

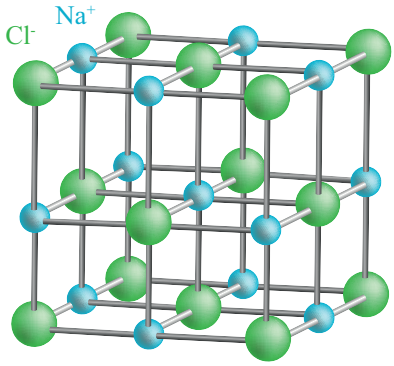


Figure 2.8 – Représentation éclatée du cristal du chlorure de sodium
Les ions chlorure Cl^- occupent tous les sommets et les centres des faces de ce cube tandis que les ions sodium Na^+ occupent le centre du cube et le milieu de toutes les arêtes

Retrouvez une animation du cristal de sel en 3D sur le site ChemTube3D avec

Multiplicité et constitution de la maille :

IONS CHLORURE Cl^-	IONS SODIUM Na^+
8 ions Cl^- à chaque sommet du cube. Chaque sommet étant partagé avec 8 mailles, chacun de ces ions compte pour 1/8 donc $N = 8 \times 1/8 = 1$ ion Cl^-	1 ion Na^+ au centre du cube qui est propre à cette maille donc $N = 1$ ion Na^+
6 ions Cl^- au milieu de chaque face du cube. Chaque face étant partagée avec 2 mailles, chacun de ces ions compte pour 1/2 donc $N = 6 \times 1/2 = 3$ ions Cl^-	12 ions Na^+ au milieu de chaque arête du cube. Chaque arête étant partagée avec 4 mailles, chacun de ces ions compte pour 1/4 donc $N = 12 \times 1/4 = 3$ ions Na^+.
TOTAL $N = 4$	TOTAL $N = 4$

Tableau 2.3 – Multiplicité et constitution de la maille

La maille possède donc 4 ions chlorure et 4 ions sodium (il y a donc un rapport de 1 pour 1), ce qui explique la formule brute NaCl.

Compacité :

$$C = \frac{N_{Cl^-} \times V_{Cl^-} + N_{Na^+} \times V_{Na^+}}{a^3} = \frac{N_{Cl^-} \times \frac{4}{3}\pi(R(Cl^-))^3 + N_{Na^+} \times \frac{4}{3}\pi(R(Na^+))^3}{a^3}$$

avec $N_{Cl^-} = N_{Na^+} = 4$, $R(Cl^-) = 181$ pm, $R(Na^+) = 97$ pm et $a = 556$ pm.

On trouve $C \approx 0{,}68$.

Masse volumique : par définition, $\rho = \dfrac{N_{Cl^-} \times M_{Cl^-} + N_{Na^+} \times M_{Na^+}}{\mathcal{N}_A \times a^3}$

avec $M_{Na^+} = 23{,}0$ g.mol^{-1} et $M_{Cl^-} = 35{,}5$ g.mol^{-1}. Il vient $\rho_{NaCl} = 2{,}3$ g.cm^{-3}.

Voir exercice 2 page 44.

5 Les cristaux qui nous entourent

PROBLÉMATIQUE

Quelle place occupent les cristaux dans notre environnement ?

5.1 Les cristaux en géologie

Il existe plusieurs types de roches : *magmatiques* (volcaniques et plutoniques), *sédimentaires* et *métamorphiques*.

En général, une roche est un solide de matière minérale constituée d'un ensemble d'unités : les minéraux. Mais ce n'est pas toujours le cas : certaines sont liquides, comme le pétrole, et d'autres gazeuses, comme le gaz naturel.

COURS

Une roche peut être constituée de plusieurs minéraux ou d'un seul type de minéral. Ainsi, le granite contient 4 minéraux différents (voir le tableau ci-dessous), alors que le quartzite n'en contient qu'un seul (le quartz). Cette organisation se retrouve à l'échelle microscopique.

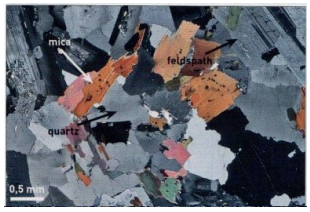
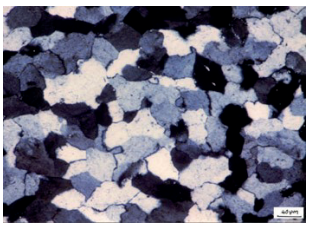
Roche	Granite	Quartzite
Photo au microscope polarisant en lumière polarisée analysée (LPA)		
Localisation	Croûte continentale	Croûte continentale
Composition minéralogique	Quartz, biotite (mica noir), feldspaths (plagioclase et orthose)	Quartz

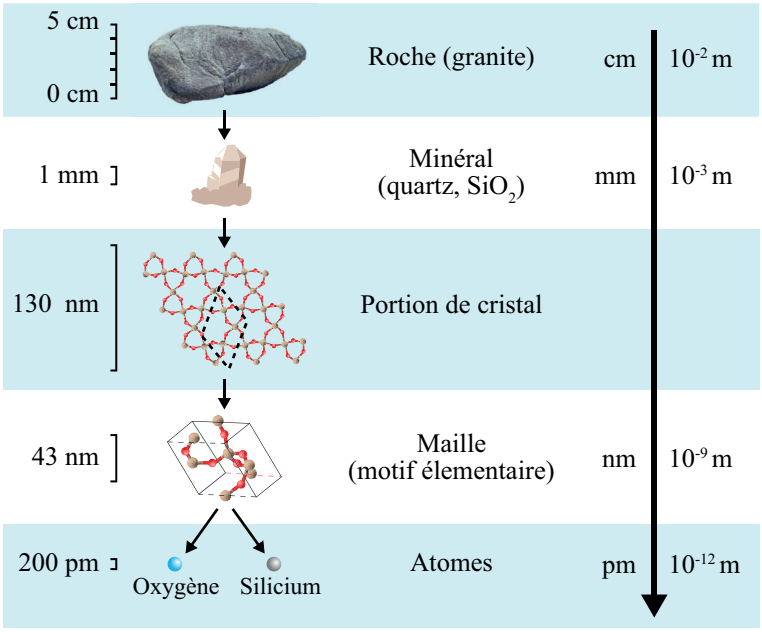
Tableau 2.4 – Comparaison granite / quartzite

Il est à noter que *minéral* n'est pas équivalent à *cristal* :

- *Un minéral* est une substance inorganique homogène définie par sa composition chimique et son organisation cristalline. Par exemple, le quartz a pour formule SiO_2 et l'olivine $(Mg,Fe)_2[SiO_4]$. Un minéral peut-être naturel ou synthétique : le diamant, par exemple, peut être créé par l'Homme, ou exister dans la nature. Dans de rares cas, les minéraux sont *organiques*, car ils contiennent du carbone : oxalate, citrate...
- *Un cristal* est caractérisé par la répétition de sa maille, qui forme le *réseau cristallin*. Si un cristal peut croître sans entrave, il présente macroscopiquement (à l'œil nu) la forme de sa maille.

On retrouve donc l'organisation suivante :

Voir le schéma à la page suivante.



La matière minérale peut être :

- soit *cristallisée* : dans ce cas, les atomes s'agencent dans une maille qui se répète pour former un cristal.
- soit *non cristallisée*, ou *amorphe* : dans ce cas, les atomes s'agencent sans aucune structure particulière ni répétition ; on appelle cet état du verre.

En géologie, on peut trouver des roches magmatiques d'aspect différent mais de composition chimique et minéralogique identiques. Cela indique que la composition du magma originel était identique. Un magma est produit suite à la fusion d'une roche. Le magma donne une *roche magmatique plutonique* s'il cristallise en profondeur. A l'inverse, le magma arrivant en surface perd ses gaz et donne une lave qui produira une *roche magmatique volcanique en surface*. Dans l'exemple de la formation de la croûte océanique :

- lorsque le magma cristallisera lentement en profondeur, il donnera du gabbro (roche magmatique plutonique) ;
- lorsque le magma cristallisera rapidement en surface, il donnera du basalte (roche magmatique volcanique).

La texture caractérise l'arrangement des cristaux entre eux. Celle du gabbro est *grenue* ou *holocristalline* (totalement cristallisée) et les minéraux sont bien visibles : on parle de phénocristaux. Le basalte est composé des mêmes minéraux, mais peu sont visibles. Ils sont pris dans une pâte amorphe. La texture est *hémicristalline* ou microlithique (quelques cristaux pris dans une pâte). Grâce au microscope, on saura quelle est la composition de la pâte.

COURS

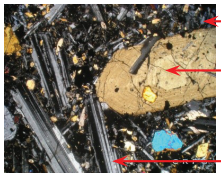
Roche	Basalte (roche magmatique volcanique, formée en surface)	Composition (* pour cristal)	Gabbro (roche magmatique plutonique, formée en profondeur)
Photo au microscope polarisant en lumière polarisée analysée (LPA) au grossissement 40		Verre Pyroxène* Feldspath plagioclase*	
Refroidissement	rapide		lent

Tableau 2.5 – Comparaison de la structure des roches de la croûte océanique

POUR ALLER PLUS LOIN

Une modélisation analogique permet de comprendre cette différence de texture. Dans une expérience, on peut faire fondre de l'éthylvanilline puis on la laisse refroidir plus ou moins rapidement afin de permettre la cristallisation. L'éthylvanilline fondue représente le magma à l'origine de la même composition des deux roches et la mise en contact avec glace ou non, un refroidissement rapide ou non.

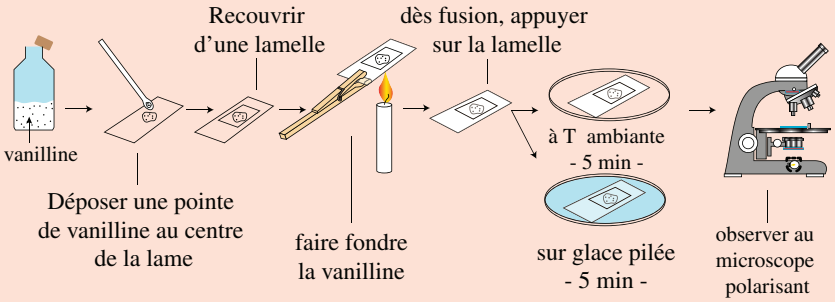


Figure 2.9 – Modélisation analogique – Refroidissement de l'éthylvanilline fondue

En comparant les lames minces des résultats de l'expérience, on remarque que suite à un refroidissement rapide, il y a une cristallisation partielle alors qu'en cas de refroidissement lent la cristallisation est totale.

À RETENIR

Un minéral est donc caractérisé par sa formule chimique et sa maille cristalline.

À RETENIR

Les minéraux se distinguent par l'arrangement de leur réseau cristallin, ce qui leur confère des propriétés différentes. Une association de cristaux d'un ou plusieurs minéraux forme une roche.
Certaines roches contiennent du verre, c'est à dire une structure amorphe non cristallisée dans laquelle les entités occupent des positions sans ordre géométrique. La texture d'une roche (grenue ou microlithique) dépend de son lieu de cristallisation et de la vitesse de refroidissement.

Voir exercices 6 page 47 et 7 page 48

5.2 Les cristaux d'origine biologique

Les cristaux peuvent aussi être produits par les êtres vivants. On en trouve dans de nombreuses structures solides animales ou végétales : coquille, os, émail ou calculs rénaux chez les animaux, raphides chez les végétaux,...

5.2.1 - L'émail

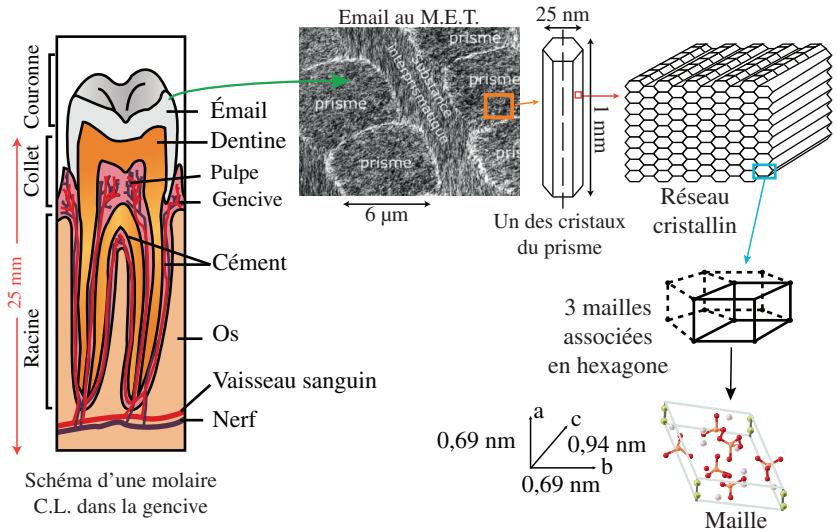


Figure 2.10 – Organisation de l'émail à différentes échelles

L'émail est la partie externe de la couronne des dents. Il est composé à 96 % de matière minérale et à 4 % d'eau et de matière organique. La partie minérale est essentiellement composée de cristaux d'hydroxyapatite de calcium ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). L'émail est constitué de nombreux prismes juxtaposés contenant des cristaux d'hydroxyapatite. Les cristaux de l'émail de section hexagonale sont dus à une répétition de la maille de l'hydroxyapatite. Si l'on ne se brosse pas régulièrement les

COURS

dents, des bactéries prolifèrent. En transformant les sucres de la plaque dentaire en acides, l'émail puis la dentine sont fragilisés. Une cavité se creuse : c'est la carie ! Une bonne hygiène bucco dentaire permet de maintenir cette structure dure mais fragile qu'est l'émail.

5.2.2 - Les calculs rénaux

Les calculs rénaux sont des solides de taille variable qui sont le résultat de la cristallisation de sels minéraux et d'acides présents dans l'urine produite par les reins. Au-delà d'une certaine concentration, les sels cristallisent. Ils sont le plus souvent composés de calcium (70 % des cas) et d'acide urique (10 %)... Dans 80 % des cas, ce sont des calculs à base d'oxalate de calcium. Sur la surface, on retrouve des cristaux de weddellite (oxalate de calcium dihydraté de formule CaC_2O_4, $2H_2O$). Les calculs rénaux peuvent être la conséquence d'un grand nombre de facteurs : consommation en eau insuffisante, apport excessif de vitamine D, certaines maladies et/ou médicaments, facteurs héréditaires ou alimentation trop riche en oxalate.

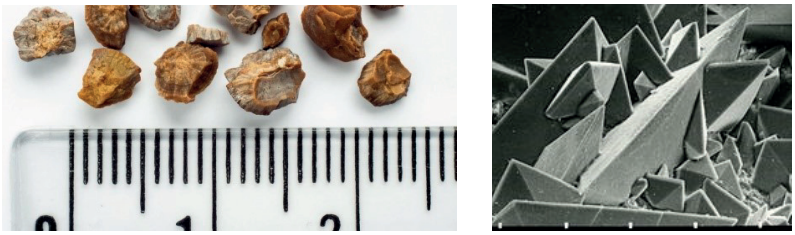


Figure 2.11 – Les calculs rénaux, des cristaux d'origine biologique

À RETENIR

Des structures cristallines existent dans les organismes vivants (calculs rénaux, émail, coquille, squelette,...) et assurent des fonctions biologiques variées.

Voir exercice 8 page 49.

1 QCM Vérification des connaissances

10 min Corrigé p. 52

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 Un cristal est :

a un fluide ; b un solide ;
c un liquide ; d un gaz.

2 Le chlorure de sodium possède un réseau :

a hexagonal ; b cubique simple ;
c cubique centré ; d cubique à faces centrées.

3 Dans un réseau cubique simple, le paramètre de maille a vaut :

a Le rayon de l'élément chimique R ;

b $2 \times R$; c R^2 ; d $\dfrac{R}{2}$.

4 Dans un réseau cubique faces centrées, le paramètre de maille, a vaut :

a $\dfrac{4R}{\sqrt{2}}$; b $2 \times R$;
c R^2 ; d $\dfrac{4R}{3}$.

5 Dans un réseau cubique faces centrées, il y a :

a 1 entité chimique ; b 2 entités chimiques ;
c 3 entités chimiques ; d 4 entités chimiques.

6 N étant le nombre d'atomes par maille, M la masse molaire de l'entité et $\mathcal{N}_A$ le nombre d'Avogadro, la compacité d'un réseau s'exprime par la relation :

a $\dfrac{N.V_{\text{maille}}}{V_{\text{motif}}}$; b $\dfrac{N.V_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}$;
c $\dfrac{N.M_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}$; d $\dfrac{N.M_{\text{motif}}}{\mathcal{N}_A.V_{\text{maille}}}$.

7 N étant le nombre d'atomes par maille, M la masse molaire de l'entité et $\mathcal{N}_A$ le nombre d'Avogadro, la masse volumique d'un réseau s'exprime par la relation :

a $\dfrac{V_{\text{maille}}}{V_{\text{motif}}}$; b $\dfrac{V_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}$;
c $\dfrac{M_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}}$; d $\dfrac{N.M_{\text{motif}}}{\mathcal{N}_A.V_{\text{maille}}}$.

INTERROS

8 Un minéral est un solide défini par :

a les paramètres de sa maille exclusivement ;

b sa composition chimique exclusivement ;

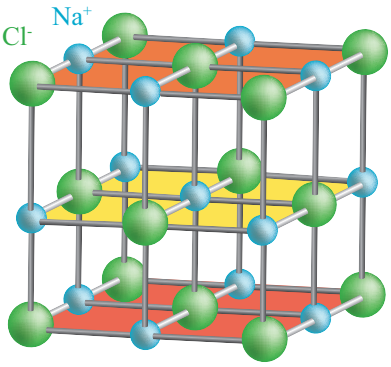
c les paramètres de sa maille et sa composition chimique.

2 Le chlorure de sodium

★ 15 min Corrigé p. 52

Lycée Lavoisier, Paris

La figure ci-contre montre la structure cristalline du chlorure de sodium.



Données des rayons atomiques :

- $R_{Na^+} = 97$ pm
- $R_{Cl^-} = 181$ pm

1 Décrire la maille de chlorure de sodium.

2 Déterminer le nombre d'ions chlorure dans la maille élémentaire.

3 Déterminer le nombre d'ions sodium dans la maille élémentaire.

4 Découpons cette maille élémentaire en 3 couches, comme proposé sur la structure cristalline du chlorure de sodium, dans la figure 2.12. Représenter chacune des couches sous la forme d'un carré de 5,6 cm de côté.

On prendra un rayon de 1 cm pour les ions sodium et un rayon de 1,8 cm pour les ions chlorures.

5 Si nous empilons des billes pour représenter l'état cristallin du chlorure de sodium, alors quelle configuration devons-nous choisir ?

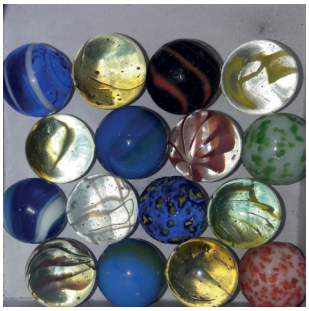


Figure 2.12 – Photo d'un empilement décalé de billes

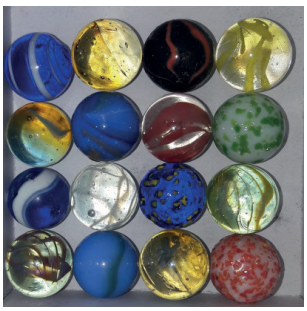


Figure 2.13 – Photo d'un empilement aligné de billes

6 Calculer la longueur de la maille (ou paramètre de maille) a en pm.

3 Le chlorure de césium

★ 15 min Corrigé p. 54

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Le chlorure de césium est un solide ionique utilisé en biologie, par exemple dans la séparation de fragment d'ADN ou dans le milieu médical, pour des traitements de radiothérapie où on utilise un isotope radioactif du césium.

L'état cristallin du chlorure de césium est un réseau cubique où le césium constitue une maille cubique simple et le chlorure vient se placer au centre du cube.

1. Représenter en perspective cavalière la maille élémentaire du chlorure de césium.
2. Déterminer le nombre d'ions chlorure puis le nombre d'ions césium dans la maille.
3. Déduire la formule brute du chlorure de césium puis la formule de l'ion césium.
4. Sachant que le paramètre de maille vaut $a = 412$ pm et que la masse molaire du chlorure de césium est $M(\text{CsCl}) = 168{,}4$ g.mol^{-1}, vérifier par le calcul que la masse volumique du cristal vaut $\rho = 4$ g.cm^{-3}.

4 Le plomb : catégorie « poids lourd »

★★ 20 min Corrigé p. 55

Lycée Pasteur, Neuilly

Voici les fiches de présentation de deux éléments chimiques.

Platine



Symbole simplifié du platine

$M(\text{Pt}) = 195{,}08$ g.mol^{-1}
$r_{\text{Pt}} = 135$ pm
C.F.C avec $a = 392{,}3$ pm
$\rho(\text{Pt}) = 21{,}45$ g.cm^{-3}
Métal blanc argenté, brillant, malléable et ductile.

Utilisé dans les médicaments et comme catalyseur.

Plomb



Symbole simplifié du plomb

$M(\text{Pb}) = 207{,}2$ g.mol^{-1}
$r_{\text{Pb}} = 180$ pm
C.F.C avec $a = 495{,}1$ pm

Métal gris terne, ductile, mou et fragile.
Il fait partie des métaux dits « lourds » (mercure ou chrome par exemple).

1. Représenter la maille élémentaire du platine en perspective cavalière.
2. Déterminer le nombre d'atomes par maille dans ce type de maille.

INTERROS

3 Donner la relation entre le rayon de l'atome de platine et le paramètre de maille a.

4 Calculer la compacité de la maille du platine.

5 Calculer la masse volumique du plomb.

6 Rédiger une conclusion comparant les masses d'un même volume de plomb et de platine.

5 Le fer dans une autre structure

★★ 20 min Corrigé p. 57

Lycée Saint-Martin, Rennes

Le fer est un élément chimique relativement abondant sur Terre, du noyau jusqu'à sa surface. C'est un métal argenté, brillant et malléable, qui en fait un des éléments les plus utilisés industriellement.

Il forme une maille élémentaire cubique centrée où les atomes de fer se placent aux sommets et au centre du cube. L'Atomium de la photo qui suit est une représentation de la maille du cristal de fer agrandie 165 milliards de fois. Ce monument, qui se trouve à Bruxelles, a été élaboré à l'occasion de l'exposition universelle de 1958.



Figure 2.14 – L'Atomium

1 Représenter la maille élémentaire en perspective cavalière.

2 Déterminer le nombre d'atomes de fer par maille.

3 Déterminer la relation entre le rayon atomique du fer R et le paramètre de maille a.

4 Calculer la compacité de la maille.

5 Calculer la masse volumique d'un cristal de fer.

Données :
- M(Fe) = 55,85 g.mol^{-1}
- R(Fe) = 126 pm

6 La cordillère des Andes

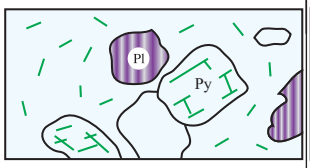
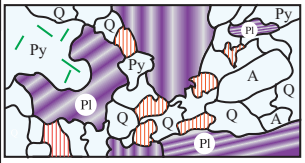
★★ 45 min Corrigé p. 58

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

La cordillère des Andes est un relief avec de nombreux volcans explosifs, appartenant à une zone de subduction. On y trouve des roches magmatiques d'aspects très différents qui ont pourtant la même composition chimique. Certaines de ces roches sont issues de la cristallisation par refroidissement du magma en surface alors que d'autres sont issues de la cristallisation par refroidissement d'un magma plus en profondeur.

Nous cherchons à comprendre les différences de formation de deux roches caractéristiques de ce contexte géologique.

Document 1 : Tableau de comparaison andésite et granodiorite

Roche	Andésite (roche magmatique)	Granodiorite (roche magmatique)
Photo des roches vues à l'œil nu (même échelle)		
Croquis de lames minces observées au microscope polarisant	A 	B  Pl : plagioclase ; Py : pyroxène ; mica ; verre ; microlite ; A : amphibole ; Q : quartz
Minéraux	Pyroxène, amphibole hornblende, feldspath plagioclase, microlites ; et pâte de verre.	Pyroxène, amphibole hornblende, feldspath plagioclase et quelques quartz.

1. Pourquoi peut-on dire que l'andésite et la granodiorite sont des roches et non des minéraux ?
2. Quels arguments nous permettent de dire que ces roches ont été formées à partir d'un même magma ?

INTERROS

3 En justifiant votre réponse, expliquer en quoi les différences de refroidissement sont à l'origine de la différence de structure de ces deux roches.

4 Réalisez un schéma bilan pour expliquer les conditions de formations de ces deux roches.

7 Formation de deux roches différentes ★★

45 min

Corrigé p. 59

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

À l'aide du tableau ci-dessous, répondez aux questions suivantes.

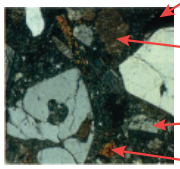
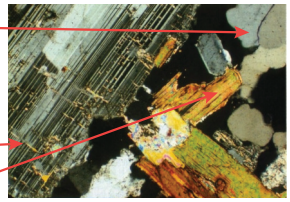
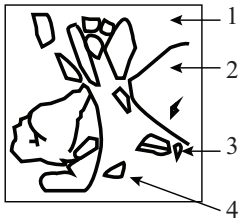
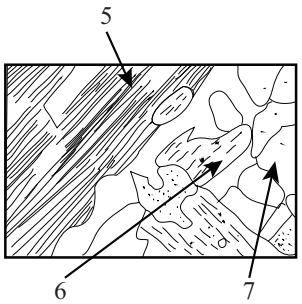
Roche	Rhyolite	Minéraux	Granite
Photo au microscope polarisant en lumière polarisée analysée (LPA), au grossissement 40		Verre Quartz Feldspath altéré Feldspath Mica	
Origine de la roche	Un même magma riche en silice		

Tableau 2.6 – Tableau de comparaison rhyolite / granite

1 Compléter les légendes des croquis d'observations de lame de rhyolite et de granite (observée au microscope polarisant au groissement 400) en utilisant les mots suivants :

phénocristal, microlite et verre (pâte non cristallisée).





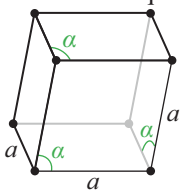
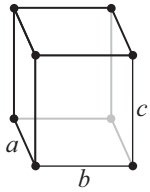
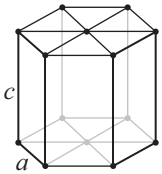
2 À partir du tableau et de vos connaissances, proposez un mode de formation pour ces deux roches. On attend une réponse structurée.

8 Coquilles d'animaux et tests d'oursins ★★ 30 min Corrigé p. 60

Lycée « en forêt », Montargis

La calcite, l'aragonite et la vatérite sont trois formes cristallines du carbonate de calcium de formule $CaCO_3$.

Le tableau ci-dessous résume les différentes caractéristiques de ces formes cristallines :

Nom	Calcite	Aragonite	Vatérite
Formule chimique	$CaCO_3$	$CaCO_3$	$CaCO_3$
Masse volumique	2,71 $g.cm^{-3}$	2,93 $g.cm^{-3}$	2,66 $g.cm^{-3}$
Maille	Rhomboédrique 	Orthorhombique 	Hexagonal 
Stabilité	Forme la plus stable.		Assez rare car c'est un cristal instable qui se dissout facilement dans l'eau pour recristalliser en calcite
Propriétés associées	Constitue majoritairement le squelette (test) des oursins. Leur confère leur solidité.	Elle constitue 95% de la nacre. Elle confère à la nacre des caractéristiques mécaniques et physicochimiques uniques.	La vatérite pourrait avoir des propriétés optiques ou thermiques exploitées par les espèces de Saxifrages qui la produisent.
Objets dans lesquels on les trouve.	Dans les roches mais aussi des coquilles d'œufs et des coquilles d'animaux marins.		Dans certaines coquilles d'œufs d'oiseaux, oreille interne des saumons et aussi sur certaines feuilles de saxifrages.

INTERROS

1 Un composé ionique est défini par sa formule chimique et sa maille. Déterminez si l'aragonite, la calcite et la vatérite sont des composés ioniques différents ou identiques. Justifiez la réponse.

2 Pourquoi peut-on dire que les structures cristallines peuvent être issues du monde vivant ?

3 En quoi les différences observées pourraient-elles expliquer certaines propriétés à l'échelle macroscopique ?

9 C'est la Bérézina !

★★★ 30 min Corrigé p. 60

Lycée « en forêt », Montargis

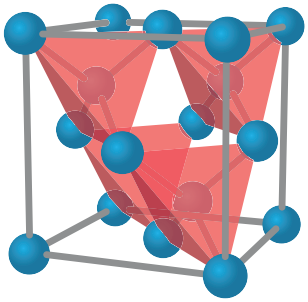
L'expression « c'est la Bérézina » est utilisée quand la situation que l'on vit est désespérée. Elle fait référence à la retraite de Russie, fin novembre 1812, quand les troupes de la Grande Armée de Napoléon ont dû traverser la Bérézina, un fleuve biélorusse. Cette rivière large d'une centaine de mètres est profonde de deux à trois mètres. La température atteignait alors les -39 °C. La légende raconte que les boutons en étain des pantalons des soldats ont explosé. Les soldats ne pouvaient plus combattre correctement ou mouraient de froid à cause de leurs vêtements non adaptés.

L'étain est un métal tendre et malléable. Il se présente sous plusieurs formes. L'une d'elles, l'étain blanc, est celle que l'on trouve au-dessus de 13 °C avec une forte masse volumique (7,27 g.cm^{-3}), tandis qu'une autre forme, l'étain gris, est moins dense (masse volumique de 5,77 g.cm^{-3}) se forme en dessous de 13 °C.

Lorsque de l'étain blanc est brutalement refroidi son réseau cristallin est ébranlé, il se désagrège en poussières. Cette transformation est d'autant plus rapide que la température est basse et, en dessous de -40 °C, il devient très rapidement pulvérulent. On appelle ce phénomène « la peste de l'étain ». L'addition de petites quantités de bismuth ou d'antimoine à l'étain empêche ce phénomène. L'étain blanc était utilisé pour fabriquer les boutons des tenues de la Grande Armée de Napoléon.

D'après un article de Bernard BODO intitulé « *La Bérézina : quand le métal devient poussière ou la guerre sans bouton. Mythe ou réalité ?* », publié sur le site Mediachimie.org.

L'étain gris cristallise dans une structure diamant. Représentée sur le schéma page suivante, une telle structure est en fait une maille cubique à faces centrées avec en plus 4 entités positionnées à l'intérieur de la maille : la maille est subdivisée en 8 cubes identiques, les atomes sont au centre de ces cubes, on parle de sites *tétraédriques*. Seuls 4 sites tétraédriques sont occupés.



1. Montrer que la multiplicité de l'étain blanc est 8.
2. Sachant que la masse molaire de l'étain est $M(\text{Sn}) = 118{,}7\ \text{g.mol}^{-1}$, calculer la longueur de la maille de l'étain gris.
3. En utilisant les données du texte et vos connaissances sur les structures des cristaux, proposer une hypothèse sur le phénomène de la « peste de l'étain ».
4. Pourquoi est-il peu probable que les boutons en étain blanc des soldats de Napoléon aient subi la « peste de l'étain » ?

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 43

1 Réponse [b].

2 Réponse [d]. Les ions chlorure, de même que les ions sodium sont aux sommets et aux centres de chaque face d'un cube décalé d'un demi coté.

3 Réponse [b]. Les entités chimiques sont tangentes par rapport aux arêtes du cube.

4 Réponse [a]. Les entités chimiques sont tangentes par rapport à la diagonale d'une face, $a\sqrt{2}$. De plus, il y a 4 rayons le long de la diagonale.

5 Réponse [d].

(8 entités aux sommets $\times\frac{1}{8}$) + (6 entités au centre des faces $\times\frac{1}{2}$).

6 Réponse [b]. Rapport entre le volume occupé par les entités chimiques et le volume de la maille.

7 Réponse [d]. Rapport entre la masse des entités chimiques et le volume de la maille.

ATTENTION

Ne pas confondre *masse molaire* et *masse* d'une entité chimique.

8 Réponse [c].

2 Le chlorure de sodium

Enoncé p. 44

Lycée Lavoisier, Paris

1 La maille est constituée :

- d'ions chlorure positionnés aux sommets du cube et au centre des faces du cube ;
- et d'ions sodium positionnés au milieu des arêtes et 1 au centre du cube.

2 Les ions chlorure :

- 8 (à chaque sommet), partagés chacun entre 8 mailles : $8 \times \frac{1}{8} = 1$;
- 6 (au centre des faces), partagés chacun entre 2 mailles : $6 \times \frac{1}{2} = 3$.

Soit au total 4 ions par maille.

3 Les ions sodium :

- 12 (au milieu de chaque arête), partagés chacun entre 4 mailles : $12 \times \frac{1}{4} = 3$;
- 1 au centre de la maille qui n'appartient qu'à cette maille : 1.

Soit au total 4 ions sodium par maille.

4

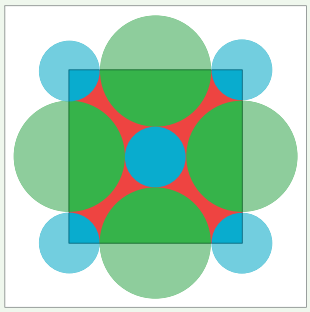


Figure 2.15 – Couche du milieu

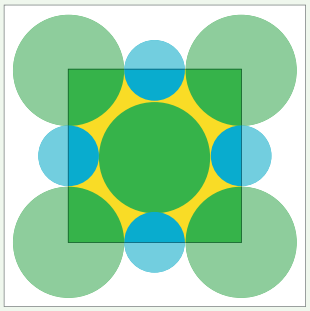


Figure 2.16 – Couche du dessus et du dessous

5

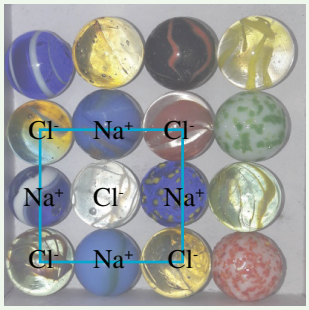


Figure 2.17 – Représentation d'une des faces du cristal du sel sur les billes

Sur les schémas de la question précédente, on observe que les ions sont tangents le long des arêtes du cube comme sur la photo choisie.

6 En se basant sur le premier schéma de la question 4, on voit qu'une arête correspond à un atome complet de Na^+ (donc deux fois son rayon) et deux demi-sphères de l'ion Cl^- (donc deux fois le rayon de cet ion). On a donc :

$$a = 2 \times R_{Cl^-} + 2 \times R_{Na^+} = 2 \times 97 \text{ pm} + 2 \times 181 \text{ pm} = 556 \text{ pm}.$$

On peut faire un raisonnement analogue à partir des autres couches des schémas de la question 4. Le résultat est toujours le même.

CORRIGÉS

3 Le chlorure de césium

Enoncé p. 45

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1

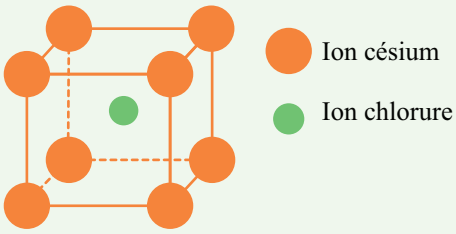


Figure 2.18 – Représentation des réseaux décalés des ions césium et chlorure puis du réseau cubique centré

Visualisez le cristal de césium sur le site de ChemTube3D avec

Dans cette perspective cavalière, 8 atomes de césium sont situés au sommet du cube et un ion chlorure au centre.

2 Il y a un ion chlorure au centre du cube et huit ions césium au sommet du cube partagés chacun avec 8 mailles voisines.

Il y a donc $8 \times \frac{1}{8} = 1$ ion césium par maille élémentaire.

3 La formule brute du chlorure de césium est donc CsCl. Sachant que la formule de l'ion chlorure est Cl^- et qu'un solide ionique est électriquement neutre alors l'ion césium s'écrit Cs^+.

Remarque : il y a donc une molécule ionique par maille élémentaire.

4 Le paramètre de maille vaut $a = 412$ pm et la masse molaire du chlorure de césium est $M(\text{CsCl}) = 168{,}4$ g.mol^{-1}. On veut vérifier par le calcul que la masse volumique du cristal vaut $\rho = 4$ g.cm^{-3}.

Pour calculer la masse volumique, il faut utiliser la formule :

$$\rho = \frac{N \times M(\text{CsCl})}{\mathcal{N}_A \times V_{\text{maille}}},$$

avec

N : nombre d'entités ; $M(\text{CsCl})$: masse molaire du CsCl ; $\mathcal{N}_A$: nombre d'Avogadro ; V_{maille} : volume d'un cube d'arête de longueur a (volume qui est égal à a^3).

Ce qui donne :

$$\rho = \frac{N \times M(\text{CsCl})}{\mathcal{N}_A \times a^3}.$$

Application numérique :

ATTENTION

Tout doit être exprimé dans la même unité que la valeur qu'on cherche c'est-à-dire en gramme et en centimètre.

$N = 1$; $a = 412 \times 10^{-12}$ m $= 412 \times 10^{-10}$ cm ;
$\mathcal{N}_A = 6{,}022 \times 10^{23}$ mol^{-1}.

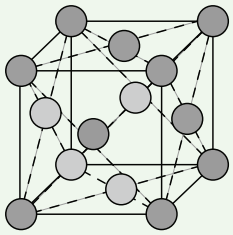
$$\rho = \frac{1 \times 168{,}4}{6{,}02 \times 10^{23} \times (412 \times 10^{-10})^3} = 4 \text{ g.cm}^{-3}.$$

4 Le plomb : catégorie « poids lourd »

Enoncé p. 45

Lycée Pasteur, Neuilly

1 Le cristal de platine formant un réseau cubique faces centrées, on peut le représenter en perspective cavalière par la figure ci-dessous (les atomes de platine situés au premier plan sont en gris foncé, ceux de l'arrière-plan en gris clair).



2 Déterminons le nombre d'atomes par maille dans ce type de maille :

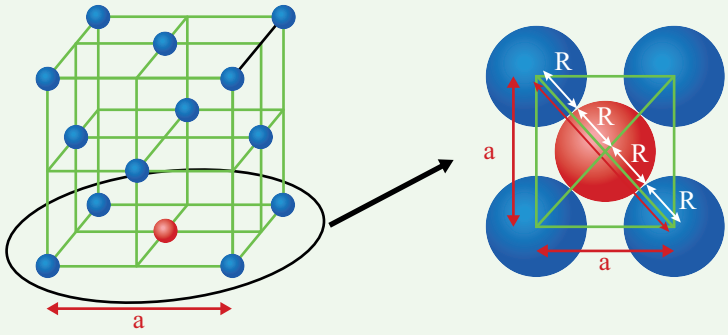
- 8 atomes au sommet du cube (partagés avec 8 mailles).
  Donc $N = 8 \times \frac{1}{8} = 1$;
- 6 atomes au milieu de chaque face (partagés avec 2 mailles).
  Donc $N = 6 \times \frac{1}{2} = 3$.

Donc il y a 4 atomes dans une maille cubique faces centrées.

3 Donnons la relation entre le rayon de l'atome de platine et le paramètre de maille a.

Les atomes de platine sont tangents par rapport à la diagonale d'une face.

CORRIGÉS



En considérant un triangle rectangle et en appliquant le théorème de Pythagore, on a :

$$a^2 + a^2 = (4R)^2$$
$$2a^2 = (4R)^2$$
$$\sqrt{2} \times a = 4R \text{ (en mettant tout à la racine)}$$

soit $a = \dfrac{4R}{\sqrt{2}}$.

4 Calculons la compacité de la maille du platine.

$$c = \frac{N \times V_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{4 \times \dfrac{4\pi R_{\text{Pt}}^3}{3}}{a^3} = \frac{4 \times \dfrac{4\pi R_{\text{Pt}}^3}{3}}{\left(\dfrac{4R_{\text{Pt}}}{\sqrt{2}}\right)^3}$$

$$= \frac{\dfrac{4 \times 4 \times \pi \times R_{\text{Pt}}^3}{3}}{\dfrac{4^3 \times R_{\text{Pt}}^3}{(\sqrt{2})^3}} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \approx 0{,}74.$$

5 Calculons la masse volumique du plomb.

$$\rho = \frac{N \times M(\text{Pb})}{\mathcal{N}_A \times a^3}$$
$$= \frac{4 \times 207{,}2 \text{ g.mol}^{-1}}{6{,}02.10^{23} \text{ mol}^{-1} \times (495{,}1.10^{-10} \text{ cm})^3}$$
$$\approx 11{,}35 \text{ g.cm}^{-3}.$$

6 La masse volumique du plomb est inférieure à celle du platine donc pour un volume donné le plomb est plus léger que le platine.

5 Le fer dans une autre structure

Enoncé p. 46

Lycée Saint-Martin, Rennes

1

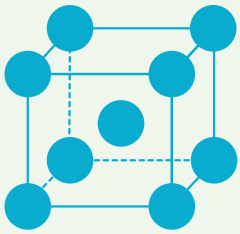


Figure 2.19 – Représentation de la maille élémentaire cubique centrée

2 Le nombre d'atomes de fer par maille est :

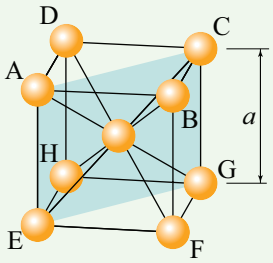
- 8 atomes au sommet du cube (partagés avec 8 mailles).

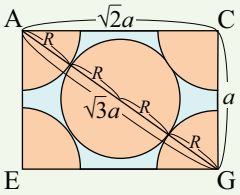
  Donc $N = 8 \times \frac{1}{8} = 1$;
- 1 atome au centre du cube donc appartenant entièrement à la maille.

Donc il y a 2 atomes dans la maille.

3 Déterminons la relation entre le rayon atomique du fer R et le paramètre de maille a.

Les atomes sont tangents par rapport à la diagonale du cube. Attention, contrairement au précédent exercice, le plan à prendre en compte est différent. Prenons comme exemple le cas ci-dessous avec des atomes au sommet et un atome au centre du cube :





Dans cette figure, a est l'arête du cube. Les atomes sont jointifs sur la diagonale AG. Pour trouver la longueur de cette diagonale, on utilise deux fois le théorème de Pythagore.

Une première fois dans le triangle ABC, rectangle en B :

$$AB^2 + BC^2 = AC^2$$

$$2a^2 = AC^2.$$

En appliquant la racine carrée à chaque membre de l'égalité, on a : $AC = \sqrt{2} \times \sqrt{a^2} = a\sqrt{2}$.

On applique Pythagore à nouveau dans le triangle ACG qui est rectangle en C :

$$AG^2 = CG^2 + AC^2.$$

Or d'après la figure, $AG = 4R$ et $CG = a$, donc :

$$(4R)^2 = a^2 + (a\sqrt{2})^2$$
$$(4R)^2 = a^2 + 2a^2$$
$$(4R)^2 = 3a^2$$
$$4R = a\sqrt{3},$$

soit $a = \dfrac{4R}{\sqrt{3}}$.

4 Calculons la compacité de la maille.

$$C = \frac{N \times V_{\text{motif}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{2 \times \dfrac{4\pi R_{\text{Fe}}^3}{3}}{\left(\dfrac{4R_{\text{Fe}}}{\sqrt{3}}\right)^3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 0{,}68.$$

5 Calculons la masse volumique d'un cristal de fer.

$$\rho = \frac{N.M(\text{Fe})}{\mathcal{N}_A \times a^3} \text{ (avec } a = \frac{4R}{\sqrt{3}}, \mathcal{N}_A \text{, le nombre d'Avogadro et } M \text{ la masse molaire du fer)}$$
$$= \frac{2 \times 55{,}85 \text{ g.mol}^{-1}}{6{,}02.10^{23} \text{ mol}^{-1} \times \left(\frac{4\times 126.10^{-10} \text{ cm}}{\sqrt{3}}\right)^3} \approx 7{,}53 \text{ g.cm}^{-3}.$$

6 La cordillère des Andes

Enoncé p. 47

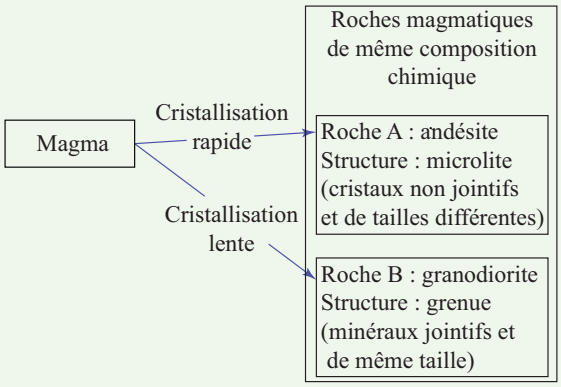
Lycée Evariste Galois, Sartrouville

1 L'andésite et la granodiorite sont des roches car elles sont composées de plusieurs minéraux caractérisés chacun par leur composition chimique et leur organisation cristalline.

2 Les deux roches ont la même composition chimique. Ces éléments se sont organisés pour former les mêmes minéraux, ce qui laisse supposer que la cristallisation par refroidissement s'est réalisée à partir d'un même magma.

3 L'observation microscopique permet de montrer que les roches sont constituées des mêmes minéraux mais que leur structure est différente. En effet, l'andésite est constituée de petits cristaux entourés d'une pâte amorphe. Cette structure caractérise une roche microlithique qui s'est formée rapidement et en surface. À l'inverse, la granodiorite présente des cristaux jointifs, s'expliquant par une cristallisation plus lente, généralement en profondeur. Ainsi, une différence de conditions de refroidissement explique bien la différence de structure observée au microscope.

4 Le schéma-bilan de formation de l'andésite et de la diorite est le suivant :



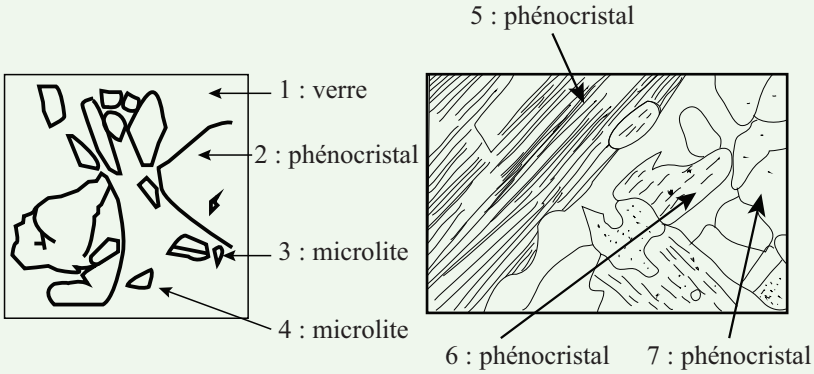
7 Formation de deux roches différentes

Enoncé p. 48

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

1 Les phénocristaux sont de gros cristaux, alors que les microlites sont des petits cristaux. Le verre, pâte amorphe, apparaît en noir au microscope en lumière polarisée analysée.

Il fallait donc compléter les dessins d'observation de la manière suivante :



2 On cherche à expliquer comment se sont formés la rhyolite et le granite.

Dans le document, on voit que la rhyolite et le granite sont issus d'un même magma riche en silice et sont composés des mêmes minéraux. Donc ces deux roches se sont constitués à partir d'un même magma, probablement dans une même zone géographique.

En analysant leur structure au microscope, on voit que la rhyolite présente du verre et des microlites. La rhyolite a donc une structure microlithique (on parle aussi de structure hémicristalline). Or, on sait que la présence de verre, matière amorphe, indique que la matière n'a pas pu former de réseau cristallin dans tout le volume de la roche. Elle est caractéristique d'un refroidissement rapide du magma. Donc la rhyolite est issue du refroidissement rapide d'un magma riche en silice.

À l'inverse, le granite présente une structure grenue avec des phénocristaux jointifs et de taille similaire. Or on sait que cette structure se forme quand le refroidissement du magma est lent. Donc le granite s'est formé par un refroidissement lent d'un magma riche en silice.

Pour conclure, rhyolithe et granite ont la même composition chimique. Ces roches magmatiques se sont donc formées à partir d'un même magma riche en silice. Le magma s'est formé en profondeur. Il est remonté soit rapidement et a refroidi en surface et est à l'origine de la rhyolithe : c'est une roche magmatique volcanique. Soit le magma a cristallisé lentement en profondeur formant du granite. Le granite est une roche magmatique plutonique.

8 Coquilles d'animaux et tests d'oursins

Enoncé p. 49

Lycée « en forêt », Montargis

1 On voit que la calcite, l'aragonite et la vatérite sont des composés ioniques qui ont tous la même formule chimique $CaCO_3$, mais des mailles différentes. Or, on définit un composé ionique par sa formule chimique et les caractéristiques de sa maille. Donc on en déduit que ce sont des composés ioniques différents.

2 La calcite, l'aragonite et la vatérite sont trois entités organisées dans un réseau. Ces structures sont fabriquées par des animaux ou des végétaux. Donc on peut dire que certaines structures cristallines sont issues du monde vivant.

3 Dans le tableau, on note qu'il est rare de trouver dans un milieu naturel de la vatérite car elle est peu stable en présence d'eau. Elle se dissout et forme de la calcite.

Ces structures ont aussi des propriétés physiques différentes. Par exemple la calcite qui constitue le test des oursins lui donne sa solidité.

Enfin, ces structures ont des propriétés mécaniques différentes. L'aragonite qui constitue la nacre lui confère une grande ténacité (résistance à la propagation d'une fissure). Les données que nous avons montrent que ces 3 composés ioniques sont de même formule chimique mais de maille différente.

On peut donc émettre comme hypothèse que la maille est en partie responsable des propriétés mécaniques (ténacité), physiques (solidité) et chimique (plus ou moins stable en présence d'eau) d'un composé ionique.

9 C'est la Bérézina !

Enoncé p. 50

Lycée « en forêt », Montargis

1 Calculons la multiplicité de l'étain blanc :

- 8 entités aux 8 sommets du cube partagés chacun avec 8 mailles : $8 \times \frac{1}{8} = 1$;
- 6 entités au milieu des 6 faces du cube, chacune partagée avec 2 mailles : $6 \times \frac{1}{2} = 3$;
- 4 entités sur les sites tétraédriques, non partagées : $4 \times 1 = 4$.

Donc $N = 1 + 3 + 4 = 8$.

2 Calculons la longueur de l'arête de la maille :

$$\rho = \frac{N \times M(\text{Sn})}{\mathcal{N}_A \times V_{\text{maille}}}$$

avec

N : nombre d'entités ;

$M(\text{Sn})$: masse molaire de l'étain ;

$\mathcal{N}_A$: nombre d'Avogadro ;

V_{maille} : volume d'un cube d'arête de longueur a (volume qui vaut a^3).

On a alors :

$$a^3 = \frac{N \times M(\text{Sn})}{\mathcal{N}_A \times \rho}$$

avec les valeurs numériques suivantes : $N = 8$; $M(\text{Sn}) = 118{,}7$ g.mol^{-1} ; $\mathcal{N}_A = 6{,}022.10^{23}$ mol^{-1} et $\rho = 7{,}29 \times 10^6$ g.cm^{-3}. Ainsi :

$$a^3 = \frac{8 \times 118{,}7}{6{,}022.10^{23} \times 7{,}29} = 2{,}163 \times 10^{-22},$$

soit $a = \sqrt[3]{2{,}163.10^{-22}} \approx 6 \times 10^{-8}$ cm.

Sachant que 1 Å = 10^{-8} cm, on a : $a = 6$ Å.

3 Lorsque de l'étain blanc est brutalement refroidi, son réseau cristallin est ébranlé : l'arrangement dans l'espace des atomes n'est plus le même. L'organisation en maille n'est plus la même. Or la structure cristalline détermine les propriétés physiques de la matière. Donc quand l'étain blanc refroidit rapidement et en dessous de -40 °C , son réseau cristallin est modifié. Il n'a plus les mêmes propriétés physiques et devient pulvérulent. On appelle ce phénomène « la peste de l'étain ».

4 Cette transformation est d'autant plus rapide que la température est basse et en dessous de -40 °C. Or l'énoncé nous dit que « la température atteignait -39 °C ». La température n'était donc pas assez basse pour que les boutons des soldats explosent.

Chapitre 3

Une structure complexe : la cellule vivante

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La construction de la théorie cellulaire
3. Un milieu cellulaire délimité par la membrane plasmique

1 Introduction

Dès l'Antiquité, le philosophe grec Aristote (-384 à -322 avant J.C.) parvient à la conclusion que les animaux et les plantes sont formés d'un nombre *limité* d'éléments qui se répètent. Aujourd'hui, il est admis que la cellule constitue l'unité structurale fonctionnelle et fondamentale des êtres vivants.

PROBLÉMATIQUE

Comment les avancées scientifiques ont-elles permis de comprendre la structure et le fonctionnement des cellules ?

2 La construction de la théorie cellulaire

PROBLÉMATIQUE

Comment la théorie cellulaire s'est-elle construite ?

2.1 Rappels sur la notion de cellule

La *cellule* est constituée d'une *membrane* plasmique qui permet des échanges de matière et d'énergie avec l'environnement, et d'un *cytoplasme* pouvant contenir, ou non, un noyau et des organites. Dans le cas des cellules eucaryotes, le *matériel génétique* se trouve dans le *noyau des cellules*, séparé du cytoplasme par l'enveloppe nucléaire. La cellule contient des organites, c'est à dire des structures intracellulaires de formes bien définies, délimitées par une membrane intracellu-

laire, et remplissant une fonction bien définie. Parmi les cellules eucaryotes, on distingue les *cellules animales* et les *cellules végétales*. La majorité des cellules végétales se caractérisent par la présence d'une *paroi cellulosique*, d'une *vacuole* et de *chloroplastes*, qui permettent de réaliser la photosynthèse.

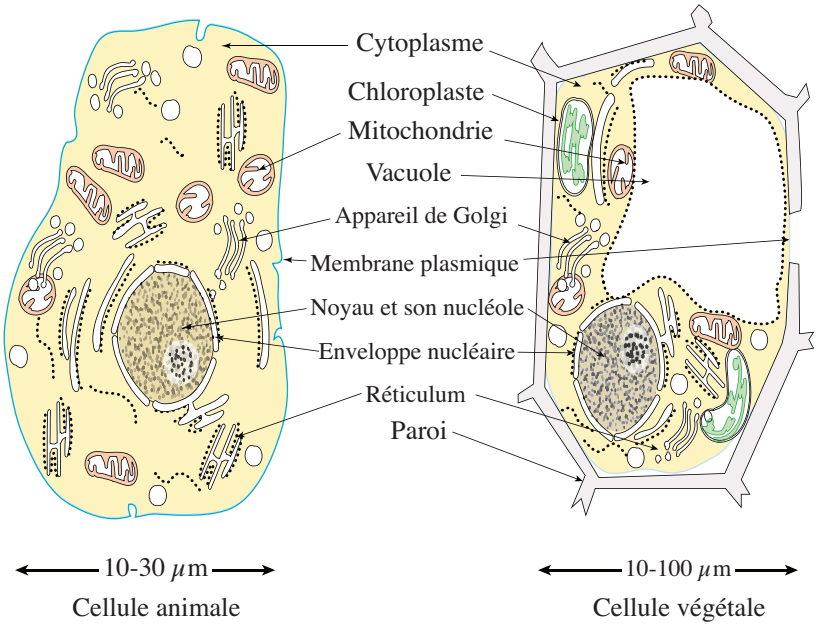


Figure 3.1 – Comparaison des structures observables au M.E.T. d'une cellule aminale type (à gauche) et végétale type (à droite)

2.2 L'utilisation de la microscopie

L'observation de cellules peut être réalisée grâce à un *microscope optique* (ou *photonique*), qui utilise la lumière naturelle, et grossit au maximum jusqu'à environ 1 000 fois l'objet observé. Cela permet d'apprécier la forme des cellules, leur taille, voire les éléments qu'elles contiennent. Une cellule animale mesure en général quelques micromètres (1 μm=10^{-6} m) à quelques dizaines de micromètres. Une cellule végétale est souvent de plus grande dimension (jusqu'à 200 μm).

Le *microscope électronique* fonctionne sous vide par envoi d'un faisceau d'électrons sur l'objet à observer. Il offre un grossissement beaucoup plus élevé (plusieurs dizaines de milliers de fois) et donne une grande quantité de détails. Il permet de détailler les éléments contenus dans le cytoplasme. Des structures jusque-là inaccessibles avec le microscope optique ont ainsi pu être observées et ont permis la compréhension de l'organisation et du fonctionnement cellulaire. Le

microscope électronique permet d'enregistrer des images par un procédé nommé *électronographie*.

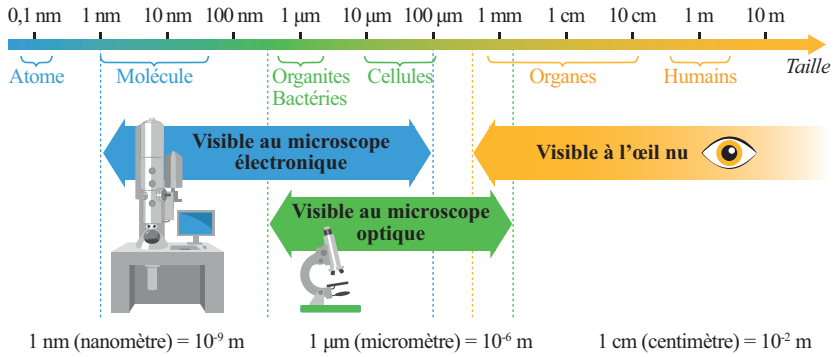


Figure 3.2 – Microscopie et échelles d'observation

2.3 La construction historique de la théorie cellulaire

Grâce à l'invention de la lentille optique, puis des premiers microscopes à la fin du XVI^e^ siècle, il a été possible de confirmer l'hypothèse d'Aristote selon laquelle les animaux et les plantes sont formés d'un nombre limité d'éléments qui se répètent. Au XVII^e^ siècle, en Angleterre, Robert Hooke utilisa un *microscope optique* de son invention, capable d'agrandir 30 fois l'objet observé. En 1665, il observe un morceau de liège où il découvre un maillage répété de cavités géométriques délimitées par d'épaisses séparations ; il donne le nom de « *cellules* » à ces cavités, en pensant aux cellules des moines dans les monastères, et les qualifie de « *plus petites unités structurelles de la vie* ».

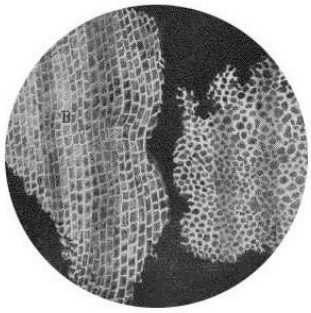


Figure 3.3 – Dessin d'observation (microscope optique) de liège par R. Hooke.

Les entités qu'il observait mesuraient entre 50 μm et 100 μm en moyenne, et il s'agissait en fait de cellules mortes. Sa découverte marqua le début de la future théorie cellulaire.

En Hollande, Van Leeuwenhoek inventa un microscope optique plus puissant pouvant observer des structures allant jusqu'à 1,4 μm. A partir de 1674, il dessina de

COURS

manière très détaillée de nombreux micro-organismes mobiles qu'il avait observés dans une goutte d'eau d'un lac. Il les qualifia alors d'animalcules (signifiant petit animal, plus tard nommés protozoaires). On lui doit aussi l'observation des spermatozoïdes. Devant le scepticisme de ses contemporains, il dût demander le soutien de Robert Hooke.

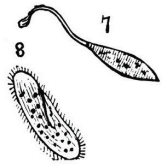


Figure 3.4 – Dessin d'observation (microscope optique) de spermatozoïdes et d'animalcules par Van Leeuwenhoek

Malheureusement, Van Leeuwenhoek garda le secret de fabrication de ses lentilles et il faudra attendre des décennies après sa mort pour disposer à nouveau d'appareils aussi puissants. De plus, personne n'avait réellement compris l'importance ni la portée de sa découverte et ce n'est qu'au XIX^{e} siècle que le concept de cellule va se préciser et s'imposer au titre de théorie.

En Allemagne, le botaniste Schleiden et le zoologiste Schwann comparent leurs observations microscopiques. Schleiden observe que toutes les parties d'une plante sont composées de cellules et affirme l'importance du noyau au cours de la division cellulaire. Schwann, en travaillant avec lui, fait le lien avec ses observations sur les animaux. En 1838, Schleiden et Schwann établissent deux des trois principes de la théorie cellulaire :

- tout organisme vivant est composé d'au moins une cellule ;
- la cellule est la plus petite structure du monde vivant.

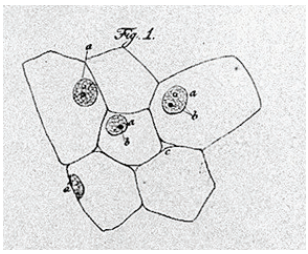


Figure 3.5 – Dessin d'observation (microscope optique) de cellules animales par Schwann

Depuis Aristote, on pensait que les êtres vivants se formaient d'eux-mêmes à partir de matière inanimée, par *génération spontanée*.

Mais en 1859, Louis Pasteur va réfuter cette idée à l'aide d'une expérience à partir de quatre flacons contenant de l'eau et des éléments nutritifs (donc des cellules vivantes). Le premier flacon est laissé tel quel, et les trois autres sont portés à

ébullition afin de tuer toute trace de vie à l'intérieur (stérilisation). Parmi ces trois flacons, l'un reste ouvert (n° 2), l'autre est fermé (n° 3) et le dernier est muni d'un col de cygne empêchant l'arrivée de particules en provenance de l'air (n° 4).

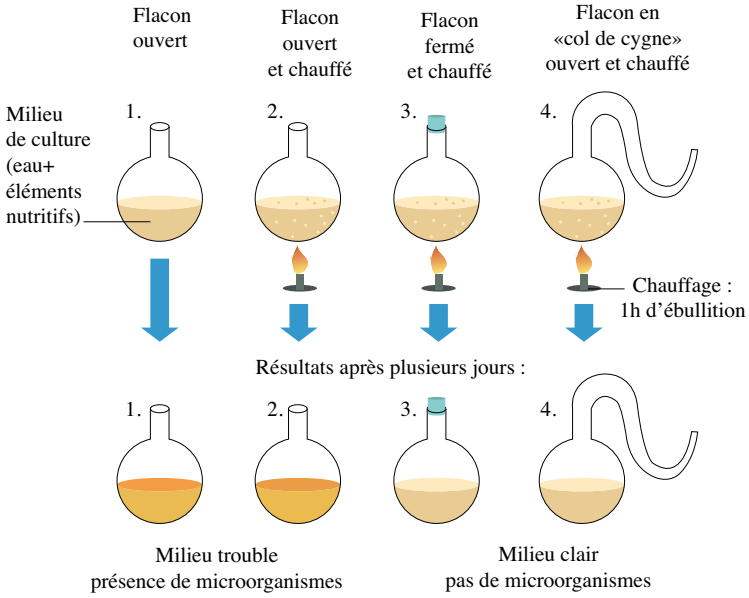


Figure 3.6 – Expériences de Pasteur

Dans les flacons 1 et 2 en contact avec l'air, des micro-organismes se développent, même après l'ébullition, alors qu'il n'y a rien dans les flacons qui ne sont pas en contact avec l'air après ébullition. Les micro-organismes ne se forment donc pas à partir de matière inerte stérilisée : ils sont dans l'air et contaminent le milieu de culture. Les travaux de Pasteur renforcent l'idée du médecin allemand Virchow qui suggérait en 1855 que *toute cellule provient d'une autre cellule*.

À RETENIR

Les trois principes de la théorie cellulaire sont alors les suivants :

1 tout organisme vivant est constitué d'une ou plusieurs cellules ;

2 la cellule est l'unité de base de la vie ;

3 toute cellule provient d'une autre cellule.

La chronologie de la construction de la théorie cellulaire puis de son évolution peut être résumée par la frise qui suit.

COURS

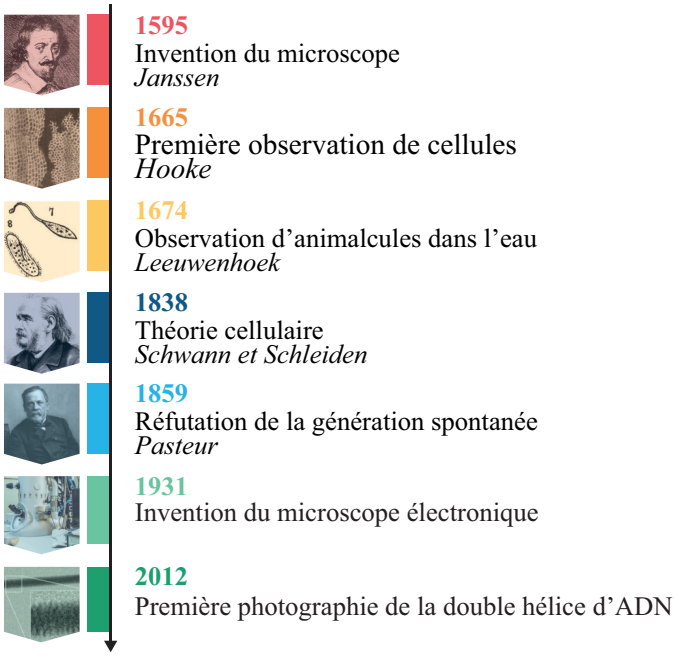


Figure 3.7 – Frise chronologique simplifiée de l'évolution de la théorie cellulaire

À RETENIR

L'invention du microscope a permis d'observer que la matière vivante, malgré une très grande diversité, présente une organisation en unités appelées cellules. La théorie cellulaire, née d'intuitions mises en relation avec des observations permises par des progrès techniques, indique que les cellules constituent toujours l'unité de structure, de fonction et de reproduction du vivant. Il a fallu plusieurs siècles, les réflexions et les travaux de nombreux savants et chercheurs, pour que cette théorie soit élaborée et s'impose.

3 Un milieu cellulaire délimité par la membrane plasmique

PROBLÉMATIQUE

En quoi la membrane plasmique permet-elle la délimitation du milieu cellulaire ?

3.1 Composition de la membrane plasmique

Retrouvez un MOOC sur la membrane plasmique avec live!

Les globules rouges (ou hématies) étant des cellules dépourvues d'organite, il est facile d'étudier leur membrane plasmique car il n'y a pas de risque de confusion avec les membranes des organites. C'est pourquoi leur composition a pu être déterminée dès 1926. Aujourd'hui, il est possible de compléter ces premières mesures et de faire des comparaisons avec d'autres types de cellules. Afin d'analyser les membranes, les cellules sont détruites par éclatement et centrifugées afin d'en séparer les composants.

Composition / Cellule étudiée	Protéines (%)	Lipides (%)	Glucides (%)
Globule rouge humain	49	43	8
Cellule de foie de souris	44	52	4
Bactérie (microbe)	75	25	0

Tableau 3.1 – Tableau de comparaison de la composition des membranes de quelques cellules

On remarque une constante : la membrane plasmique est avant tout constituée de *protéines* et de *lipides*, molécules organiques riches en atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H).

3.2 Organisation et rôle de la membrane plasmique

Grâce au microscope électronique, on a pu déterminer que l'épaisseur de la membrane plasmique était d'environ 7,5 nm. Elle est majoritairement composée de *lipides* organisés en deux couches (on parle de bicouche), entre lesquels des *protéines* viennent s'insérer. On trouve aussi des *glucides* à sa surface.

Les lipides sont essentiellement des phospholipides, qui sont des molécules électriquement neutres comportant :

- Deux longues chaînes d'acides gras constituées exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène appelées *queues*. Les queues ont une affinité pour les milieux non aqueux, comme l'huile par exemple, et sont dites *hydrophobes*.
- Un acide phosphorique lié à un glycérol et à un autre groupement, nommé *tête*. Les têtes, qui ont une affinité pour les milieux aqueux et les ions, sont dites *hydrophiles*.

Les phospholipides sont donc à la fois hydrophiles et lipophiles : on dit qu'ils sont *amphiphiles*.

COURS

ÉTYMOLOGIE

Lipophile vient du grec « lipos » (graisse) et « philos » (amour), et signifie donc : « qui a une affinité pour le gras ». Son contraire est *lipophobe*, du grec « phobos », craindre.
Hydrophile vient du grec « hydro » (eau) et veut dire « qui a une affinité pour l'eau et les particules chargées ». Son contraire est *hydrophobe*.
Amphiphile vient du grec « amphi » (double) et « philos » (amour), qui indique donc un comportement double.

La figure qui suit montre l'organisation d'un phospholipide, la phosphatidilcholine.

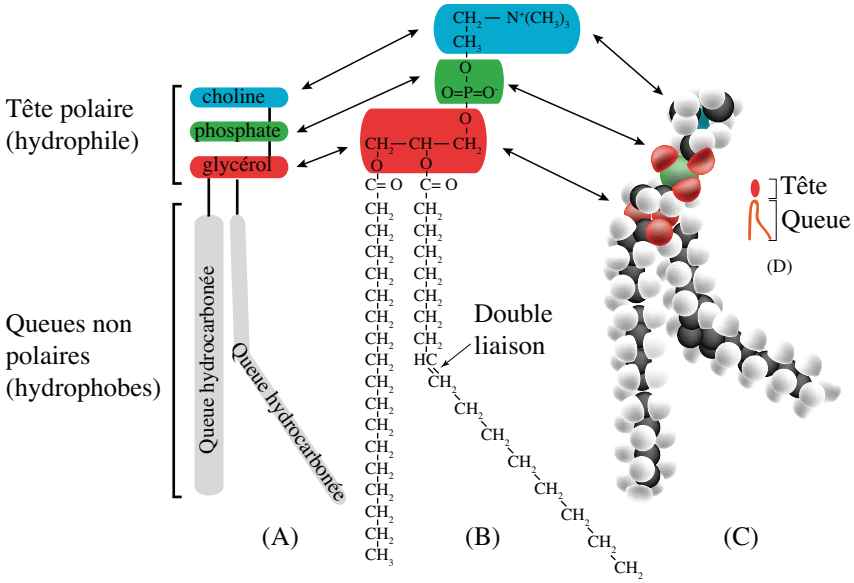


Figure 3.8 – Exemple d'organisation d'un phospholipide

Les milieux intracellulaires et extracellulaires étant aqueux et la membrane plasmique formant une bicouche, les lipides membranaires amphiphiles s'organisent comme suit : les têtes hydrophiles vers l'extérieur et l'intérieur de la cellule, et les queues hydrophobes s'attirent entre elles.

La membrane plasmique limite le cytoplasme à l'intérieur de la cellule. Mais cette limite est perméable à certaines espèces chimiques ; des échanges de matière et d'énergie (comme l'énergie lumineuse ou l'énergie thermique) peuvent se produire entre l'intérieur de la cellule (cytoplasme) et le milieu extérieur. La membrane plasmique peut aussi se déformer, comme par exemple dans le cas des phagocytes ingérant des microbes.

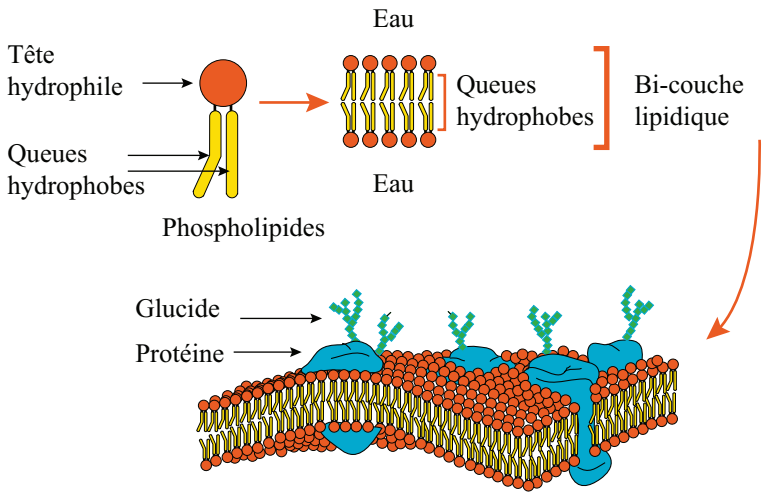


Figure 3.9 – Organisation de la membrane plasmique

Les lipides membranaires, de par leurs queues hydrophobes, laissent passer les petites molécules lipophiles. Ils ne laissent passer ni les ions (qui sont hydrophiles), ni l'eau, ni les molécules de grande taille comme le glucose. Le passage de ces dernières nécessite des *protéines transmembranaires*. Certaines protéines forment des canaux (ou pores), pouvant laisser passer spécifiquement certains ions. D'autres agissent comme des transporteurs faisant passer des molécules spécifiques d'un côté de la membrane à l'autre, comme par exemple les transporteurs de glucose.

À RETENIR

La membrane plasmique sépare le cytoplasme de la cellule du milieu extracellulaire. Elle est constituée de lipides, majoritairement des phospholipides, et de protéines. Les phospholipides sont des molécules possédant une tête hydrophile et une queue lipophile (donc hydrophobe). En milieu aqueux, ils s'assemblent spontanément en une bicouche stable, en regroupant leurs parties lipophiles au cœur de la bicouche. La membrane plasmique laisse passer les molécules lipophiles mais empêche le passage des molécules hydrophiles et des grosses molécules. Cependant, des transporteurs transmembranaires peuvent permettre ce passage. Ainsi, la cellule peut assurer ses besoins en molécules et en énergie, tout en constituant une interface séparant les milieux intracellulaire et extracellulaire.

INTERROS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 84

Choisissez la (ou les) réponses exacte(s).

1 Du plus petit au plus grand, on a :

[a] Atome, organite, molécule, cellule, organe ;

[b] Atome, molécule, cellule, organite, organe ;

[c] Atome, phospholipides, membrane, organite, cellule, organe.

2 On peut dire que :

[a] les atomes sont visibles au MET ;

[b] la membrane plasmique mesure environ 7 µm d'épaisseur ;

[c] la membrane est principalement constituée de lipides et glucides ;

[d] on peut trouver du cholestérol (amphiphile) dans les membranes plasmiques animales.

3 Associez aux personnages suivants leur contribution à la théorie cellulaire :

[a] Hooke	[i] pose deux des trois piliers de la théorie cellulaire
[b] Van Leeuwenhoek	[ii] découvre la cellule de liège avec un microscope rudimentaire
[c] Pasteur	[iii] découvre des micro-organismes avec un microscope plus puissant
[d] Schwann	[iv] permet d'invalider l'idée de génération spontanée

4 Classez du plus ancien au plus récent ces scientifiques pour leur contribution à la théorie cellulaire :

[a] Hooke, Pasteur, Schwann, Van Leeuwenhoek ;

[b] Hooke, Van Leeuwenhoek, Pasteur, Schwann ;

[c] Van Leeuwenhoek, Hooke, Schwann, Pasteur ;

[d] Hooke, Van Leeuwenhoek, Schwann, Pasteur.

5 D'après l'observation suivante, on peut dire :

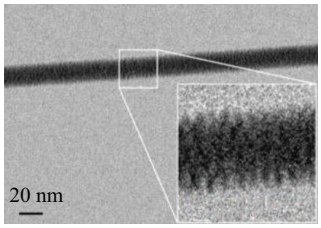


Figure 3.10 – Portion de molécule d'ADN

[a] vue l'échelle, ce cliché n'a pas pu être pris au MET ;

[b] on peut voir une structure géométrique caractéristique d'un réseau cristallin ;

[c] ce cliché laisse supposer que l'ADN est une structure enroulée.

6 D'après le schéma ci-dessous :

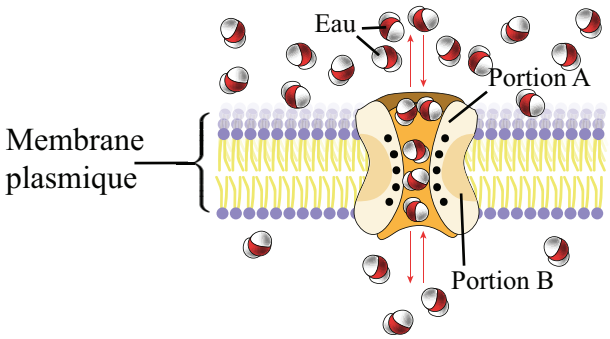


Figure 3.11 – Protéine appelée aquaporine

on peut dire que :

a la portion A est hydrophobe et la partie B est hydrophile ;
b la portion A est lipophile et la partie B est lipophobe ;
c la portion A est hydrophile et la partie B est lipophobe ;
d la portion A est hydrophile et la partie B est lipophile.

2 Et pourtant … Ce sont toutes des cellules. ★

15 min Corrigé p. 84

Lycée « en forêt », Montargis

Voici les photos de deux cellules d'organismes bien différents.

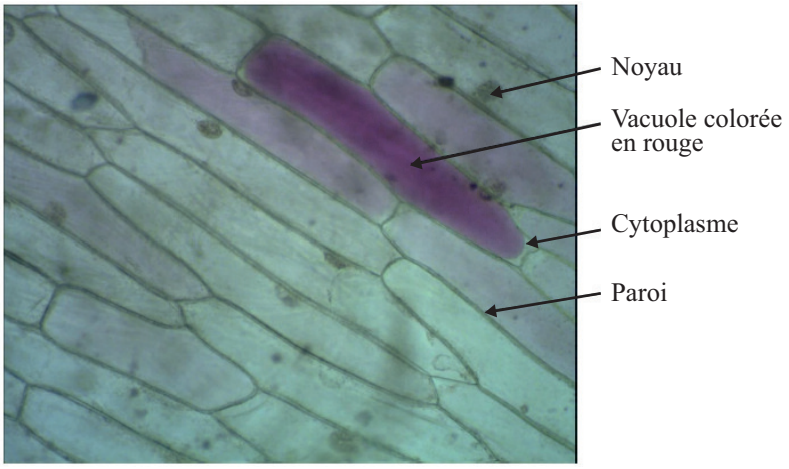


Figure 3.12 – Photo d'une observation microscopique de cellule d'épiderme d'oignon rouge. (MO) Taille réelle de la cellule : 50 µm de long.

INTERROS

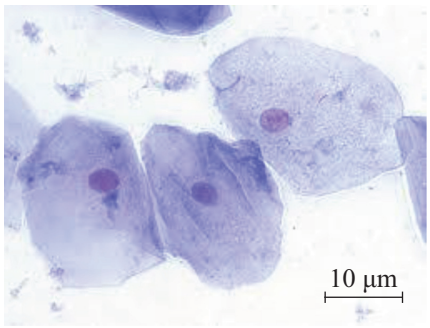


Figure 3.13 – Photo d'une observation microscopique de cellule d'épithélium buccal humain. (MO)

1. Calculez la taille réelle de la cellule d'épithélium buccal. Vous détaillerez vos calculs.
2. Qu'est-ce qui permet de dire que ces deux premières cellules sont des cellules eucaryotes ?
3. Quelles structures cellulaires permettent de dire que la 1ère photo est celle d'une cellule végétale ?
4. Avec quel type de microscope ont été prises ces photos ?
5. Quelles structures aurait-on pu observer dans une cellule bactérienne ?
6. Quel microscope doit-on utiliser pour observer les structures du cytoplasme d'une bactérie mesurant 2 μm ?
7. En quoi ces observations permettent-elles de confirmer la théorie cellulaire ?

3 Les liposomes à la rescousse

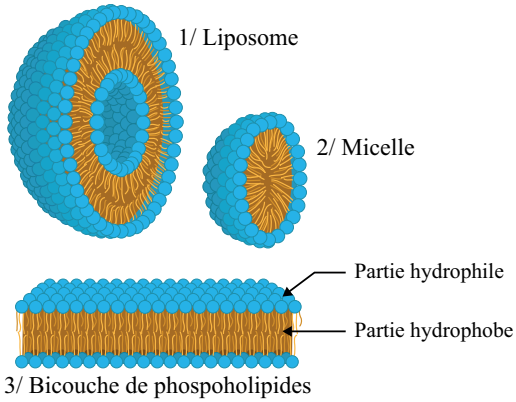
★ 10 min Corrigé p. 85

Lycée Lavoisier, Paris

Les liposomes sont des vésicules artificielles, créées par l'Homme. On les utilise en cosmétologie ou thérapie anti-cancer. Les premiers liposomes étaient constitués d'une bicouche de phospholipides naturels. Ils ont une structure très proche de celle des membranes cellulaires, leur permettant de fusionner avec elles.

Dans le traitement anti-cancer, on utilise cette structure particulière du liposome. On met le principe actif dans le liposome. Le liposome s'accroche à la cellule cancéreuse. Puis la membrane du liposome fusionne avec la membrane de la cellule cancéreuse ; le principe actif (molécule qui détruit la cellule cancéreuse) est alors libéré dans le cytoplasme de cette cellule. Ce traitement permet donc de détruire uniquement les cellules cancéreuses et pas les autres.

Le schéma à la page suivante présente des structures construites à partir de phospholipides.



1 Parmi celles de la figure précédente, choisissez la structure qui permet de transporter un principe actif hydrophile. Justifiez votre réponse.

2 En vous aidant de ces représentations, proposez un schéma de liposome en milieu aqueux, transportant plusieurs principes actifs : un hydrophile, deux lipophiles et un amphiphile. Vous noterez les légendes : phase aqueuse, molécule amphiphile, molécule hydrophile, phospholipide, molécules lipophiles.

4 Localisation d'une protéine membranaire ★★

15 min — Corrigé p. 86

Lycée Pasteur, Neuilly

Au niveau de la membrane plasmique des hématies se trouvent des protéines appelées glycophorines. Les protéines sont des molécules constituées d'acides aminés. La glycophorine étudiée ci-dessous est constituée de 131 acides aminés. Une extrémité de la protéine présente un groupe COOH intracellulaire et l'autre un groupe NH_2 et des motifs glucidiques. On peut établir le caractère hydrophobe ou hydrophile des acides aminés la composant. On obtient alors un profil d'hydrophobicité. Les valeurs positives indiquent la présence d'acides aminés hydrophobes et les valeurs négatives, celles d'acides aminés hydrophiles. Sur cette molécule, peuvent être fixés des groupes d'atomes de la famille des glucides.

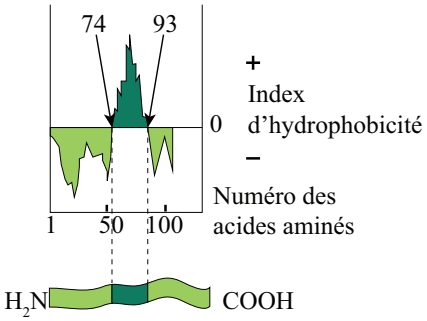


Figure 3.14 – Profil d'hydrophobicité de la glycophorine : schéma simplifié correspondant au profil

À partir de vos connaissances et des données proposées, schématisez comment pourrait être implantée cette glycophorine au niveau de la membrane plasmique des hématies. Vous justifierez votre réponse par un court texte.

On attend, en plus de l'épaisseur de la membrane plasmique, que soient bien localisés :

- le groupe NH_2,
- le groupe COOH,
- les 3 domaines verts (pouvant être déformés pour la schématisation),
- les motifs glucidiques.

On utilisera les figurés suivants en plus des figurés classiques de la membrane plasmique :



5 L'exocytose de neurotransmetteurs ★★

20 min Corrigé p. 87

Lycée Montaigne, Bordeaux

Dans cet exercice, on étudie la circulation d'un message nerveux dans l'organisme humain. Les messages nerveux circulent sous forme électrique dans les cellules nerveuses appelées neurones. Il s'agit d'échanges d'ions de part et d'autre de la membrane plasmique de cette cellule. La propagation est unidirectionnelle, elle va toujours du corps cellulaire qui contient le noyau vers l'extrémité de l'axone, prolongement du cytoplasme.

Quand le message nerveux arrive à l'extrémité de l'axone, il doit être transformé en message chimique, à cause de l'espace qui existe entre les deux cellules. Cet espace empêche la circulation de message de forme électrique. L'arrivée du message électrique à l'extrémité de l'axone induit une migration des vésicules contenant des neurotransmetteurs vers la membrane plasmique. Ces vésicules fusionnent avec la membrane plasmique : les neurotransmetteurs contenus dans les vésicules sont alors libérés dans l'espace entre les deux neurones. Cet espace est appelé fente synaptique. Les neurotransmetteurs se fixent sur des récepteurs membranaires situés sur la membrane de la deuxième cellule nerveuse. L'association neurotransmetteur-récepteur ouvre un canal ionique qui modifie la polarité de la membrane post-synaptique : un message électrique est de nouveau formé dans le neurone post-synaptique. Ce fonctionnement est illustré dans la figure qui suit.

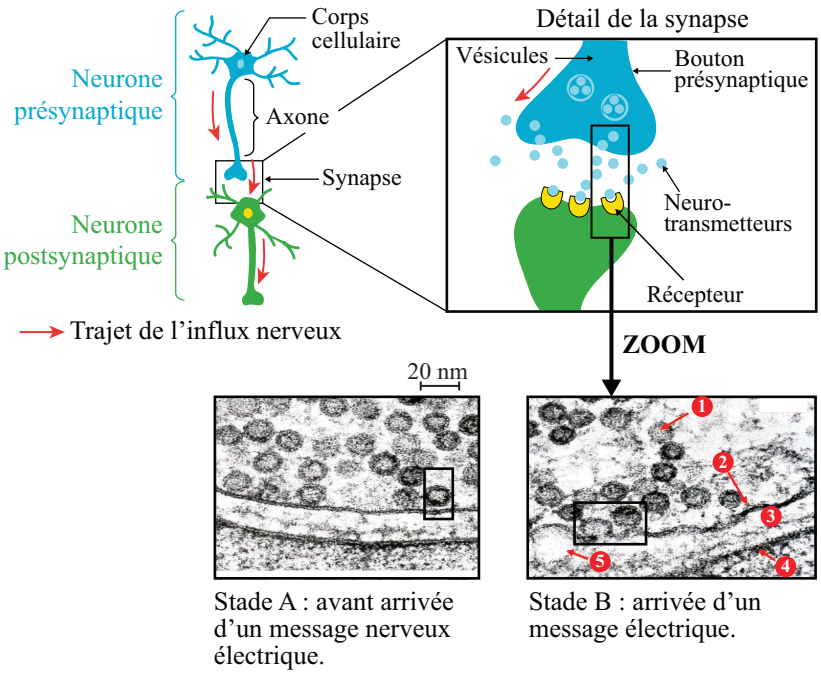


Figure 3.15 – Schéma illustrant une synapse entre deux neurones et photos de MET exposant les phénomènes qui ont lieu lors de la synapse.

Stade A : vésicule de neurotransmetteurs non fusionnée avec la membrane plasmique.

Stade B :

à gauche : vésicule ouverte déversant les neurotransmetteurs ;

à droite : vésicule en cours de fusion avec la membrane plasmique.

Légendes :

1 Vésicule contenant des molécules hydrophiles (neurotransmetteurs) délimitée par une bicouche lipidique.
2 Membrane plasmique du neurone 1.
3 Espace entre les deux neurones (fente synaptique).
4 Membrane plasmique du neurone 2.
5 Neurotransmetteurs libérés dans la fente synaptique.

À partir de vos connaissances sur l'organisation de la membrane plasmique et des informations données, proposez un schéma de ce qui se passe au niveau de l'encadré du stade A et de l'encadré du stade B.

Données :

- La membrane des vésicules peut être assimilée à une membrane plasmique.
- Les neurotransmetteurs seront représentés par des boules bleues.

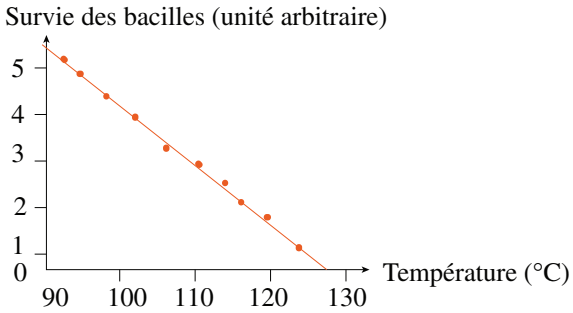
6 Pasteur vs Pouchet

★★ 25 min Corrigé p. 87

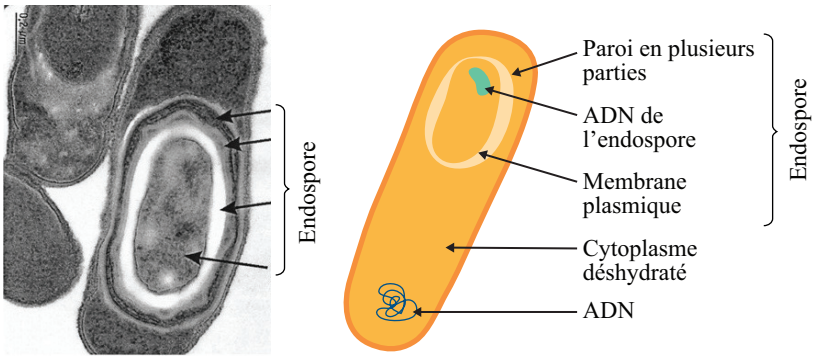
Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Felix-Archimède Pouchet était partisan de la génération spontanée. Voulant démontrer qu'il avait raison, malgré les travaux de Pasteur, il réalisa l'expérience suivante : il porta à ébullition à 100 °C de l'eau de foin, c'est-à-dire une infusion de foin, pouvant contenir des micro-organismes. Cela était censé détruire tout micro-organisme. Il ferma hermétiquement son milieu de culture pour éviter toute contamination, comme Pasteur l'avait fait. Après quelques jours, il observa que des bacilles du foin (*Bacillus subtilis*) s'étaient développés. Pour lui, cela validait la théorie de la génération spontanée : des micro-organismes s'étaient formés à partir de matière inerte.

Document 1 : Graphique présentant le taux de survie des bacilles en fonction de la température de l'eau



Document 2 : Électronographie d'endospore de *Bacillus subtilis*



Document 3 : Une nouvelle découverte

De 1872 à 1876, Ferdinand Cohn établit qu'un bacille du foin, *Bacillus subtilis*, peut former des endospores qui le rendent résistant à l'ébullition à 100 °C. Les endospores furent découvertes grâce à l'observation au microscope optique. Les endospores sont des structures intracytoplasmiques capables de résister à des conditions habituellement défavorables à la survie d'un être vivant telles que la déshydratation, le rayonnement ou les fortes températures. Elles peuvent en conditions favorables germer et redonner des bacilles actifs. Désormais, il est établi qu'à plus de 120 °C et suffisamment longtemps, le cytoplasme coagule et les cellules (même résistantes comme les endospores bactériennes) meurent. Aujourd'hui, leur structure est bien connue grâce à l'avènement du MET.

1. En vous appuyant sur les données des documents, expliquez comment sont apparues les cellules de *Bacillus subtilis* dans la culture chauffée à 100°C.
2. En quoi est-il compréhensible que Pouchet en soit arrivé à la confirmation de la génération spontanée ?
3. À la vue des connaissances acquises par Ferdinand Cohn, proposez une expérience correcte qui aurait mené Pouchet aux mêmes conclusions que Pasteur, c'est-à-dire invalider la théorie de la génération spontanée.

7 Les levures, champignons unicellulaires ★★ 35 min Corrigé p. 88

Lycée Montaigne, Bordeaux

Les levures sont des champignons unicellulaires. Ce sont des cellules eucaryotes. Elles sont entourées par une paroi. La paroi des levures est constituée d'une macromolécule glucidique : la chitine, alors que celle des végétaux est constituée de cellulose. Les levures possèdent une vacuole mais pas de plaste.

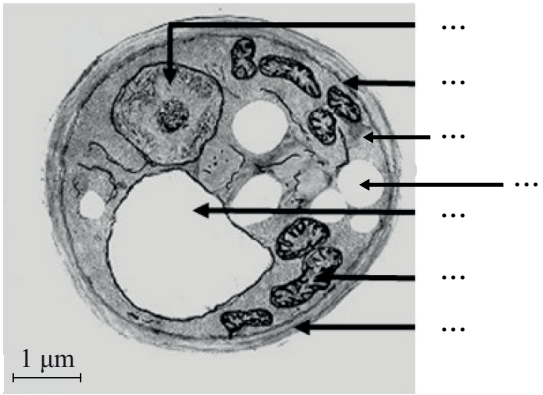


Figure 3.16 – Électronographie d'une levure (champignon unicellulaire) observée au MET. La membrane a été retravaillée pour être mieux vue.

1. Replacez les légendes suivantes sur le document : paroi, membrane plasmique, noyau, mitochondries, vacuole, gouttelette de gras, cytoplasme.
   On précise que :
   - les mitochondries ont deux membranes dont une très repliée ;

- les gouttelettes de gras ressemblent à une vacuole mais ne sont pas entourées d'une membrane, contrairement à la vacuole ;
- le noyau peut présenter une structure arrondie foncée à l'intérieure : le nucléole.

2 Quelle est la taille de cette cellule ? Justifier vos calculs.

3 À partir de vos connaissances, argumentez afin de justifier qu'il s'agit bien d'une cellule eucaryote.

4 Trouver dans le texte des arguments qui font qu'on ne met plus les champignons dans le groupe des végétaux.

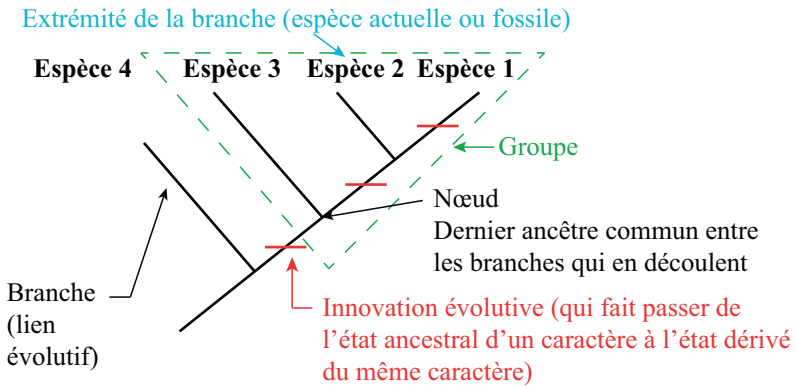
8 Les algues font bande à part

★★★ 30 min Corrigé p. 88

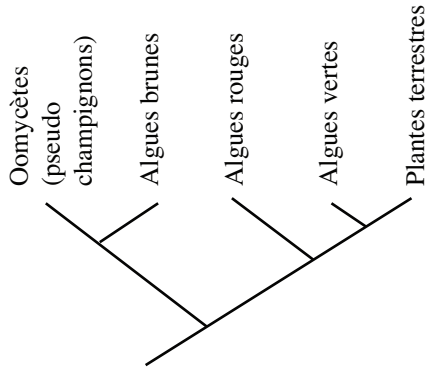
Lycée Lavoisier, Paris

La classification des êtres vivants repose sur la recherche de caractères communs partagés. Il faut chercher les caractères ancestraux et déterminer ensuite les innovations évolutives qui ont pu apparaître en comparant les espèces étudiées à un groupe considéré comme proche d'un ancêtre commun. En étudiant les structures cellulaires et les molécules qui les composent, les scientifiques ont regroupé les algues en 3 groupes. Les algues ne constitueraient pas un groupe unique issu d'un seul ancêtre commun. Les chloroplastes qu'elles contiennent ont permis d'élaborer la théorie endosymbiotique et de reconstituer l'histoire évolutive de ces êtres vivants. Selon les groupes, des procaryotes différents auraient été phagocytés (sans être digérés) par des cellules eucaryotes. Ces procaryotes internalisés et encore vivants auraient alors apporté un avantage évolutif aux cellules eucaryotes ne les ayant pas détruites : la capacité de créer des glucides par le mécanisme de la photosynthèse.

Document 1 : rappel concernant la classification



Document 2 : classification simplifiée de quelques groupes d'eucaryotes



Document 3 : principe de l'endosymbiose

L'endosymbiose est la coopération mutuellement bénéfique entre deux organismes vivants, où l'un est contenu par l'autre. La figure suivante en montre un exemple.

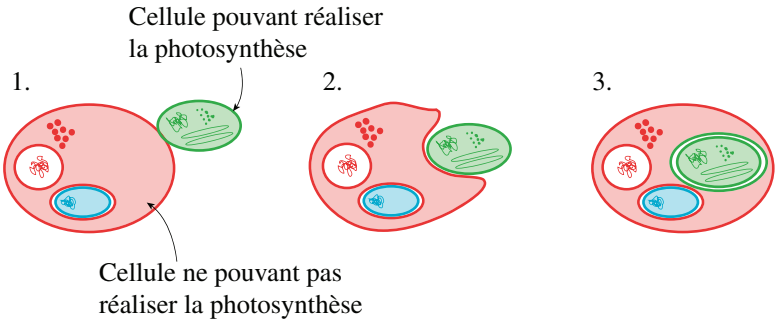


Figure 3.17 – Théorie de l'endosymbiose

Organite bleu : mitochondrie

1 : contact entre les deux cellules ;

2 : ingestion (phagocytose) ;

3 : internalisation sans digestion.

Document 4 : comparaison de quelques groupes d'organismes photosynthétiques

Le tableau de la page suivante permet de comparer les caractéristiques cellulaires et moléculaires de divers groupes évolutifs.

INTERROS

	Groupe évolutif	Nombre de membranes des chloroplastes	Matériel génétique des chloroplastes	Pigments principaux	Autres pigments	Particularités des cellules reproductrices
Procaryotes	Cyanobactérie			chlorophylle a	Phycocyanine, Allophycocyanine, (Phycoérythrine)	
	Prochlorophytes			chlorophylles a et b		
Eucaryotes	Algues rouges	2	Avec ADN type bactérien dans les	chlorophylle a	Phycocyanine, Allophycocyanine, (Phycoérythrine) dans les chloroplastes	Sans flagelles
	Algues brunes	2 ou plus		chlorophylles a et c	Fucoxanthines dans les chloroplastes	à 2 flagelles différents
	Algues vertes	2		chlorophylles a et b	Xanthophylles et Bêtacarotène dans les chloroplastes	à 2 flagelles identiques
	Plantes	2				

Tableau 3.2

1 À partir des documents fournis, expliquez comment les scientifiques ont pu trouver que les algues rouges sont un groupe séparé des algues vertes et que les algues vertes sont les plus proches des plantes terrestres.

2 À partir des documents, trouvez des arguments en faveur de l'endosymbiose, puis proposez quel type de procaryote a pu être phagocyté dans le cas des algues vertes d'une part et des algues rouges d'autre part.

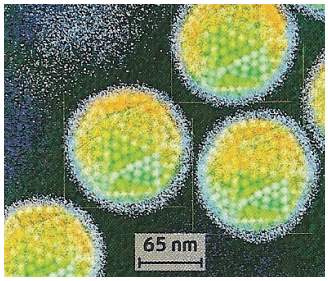
On ne cherchera pas à montrer une association à bénéfice réciproque (définition de la symbiose) mais juste à prouver qu'il a pu y avoir internalisation de cellule.

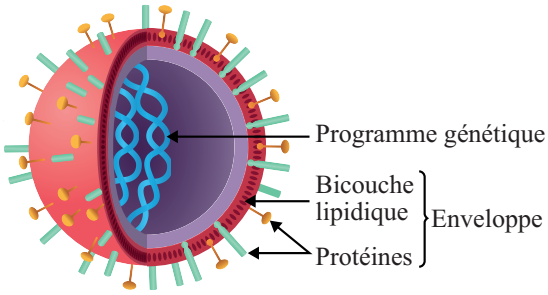
9 Aux limites du vivant : les virus

★★★ 35 min Corrigé p. 90

Les adénovirus sont des virus très communs. Chez l'Homme, ils causent des pneumonies, conjonctivites, gastro-entérites… Un virus est une particule inerte, d'environ 0,05 μm, incapable de se multiplier seule. Quand il rencontre une cellule, humaine par exemple, il se fixe à sa membrane plasmique, puis est internalisé dans le cytoplasme de la cellule hôte. L'ADN du virus est libéré dans le noyau de la cellule hôte, qui va fabriquer les molécules du virus comme si l'ADN était le sien, grâce à sa machinerie cellulaire. Quand les molécules constituant le virus sont assemblées dans le cytoplasme de la cellule hôte, elles s'approchent de la membrane plasmique de l'hôte contenant les protéines du virus, bourgeonnent puis se détachent de la cellule hôte.

Voici une photo au MET recolorisée d'un adénovirus, et le schéma interprétatif correspondant.





1 À partir de ces informations et de vos connaissances, réalisez un tableau comparant les êtres vivants et les adénovirus aux échelles moléculaire et cellulaire.

2 À partir de votre tableau et de vos connaissances sur la théorie cellulaire, précisez les arguments faisant penser qu'il s'agit d'un être vivant, puis les arguments contraires.

3 Schématisez le mécanisme qui permet d'expliquer que la membrane du virus est une membrane plasmique, comme celle de la cellule hôte.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 72

1 Réponse c.

2 Réponse d. Les atomes ne sont pas visible au MET, la membrane plasmique mesure 75 nm d'épaisseur et elle est composée surtout de lipides (en bicouche) et de protéines.

3 a ↔ ii.
b ↔ iii.
c ↔ iv.
d ↔ i.

4 Réponse d.

5 Réponse c.

6 Réponse d : la portion A est au contact de molécules d'eau, elle est donc hydrophile. Au niveau de la portion B, les acides aminés de l'aquaporine sont au contact de la bicouche lipidique donc ils sont lipophiles.

2 Et pourtant … Ce sont toutes des cellules.

Enoncé p. 73

Lycée « en forêt », Montargis

1 Pour calculer la taille réelle d'une cellule, on utilise toujours la même méthode.

Tableau de proportionnalité :

Objet	Taille sur la photo (en cm)	Taille réelle (en μm)
Échelle	0,9	10
Cellule	2,3	?

$$\text{taille à calculer} = \frac{2{,}3 \times 10}{0{,}9} = 26\ \mu\text{m}.$$

Donc cette cellule mesure environ 25 μm.

MÉTHODE

Pour calculer la taille réelle d'une cellule, on s'aide de l'échelle. On mesure l'échelle en cm sur la photo et on calcule combien de fois elle a été agrandie. On appliquera ce même coefficient à la cellule. En pratique, on construit d'abord un tableau de proportionnalité :

Objet	Taille sur la photo (en cm)	Taille réelle (en μm)
Échelle	x	y
Cellule	z	?

…

MÉTHODE

On cherche « ? », c'est-à-dire la taille réelle de la cellule. On suit la flèche, et on applique la formule : $\frac{z \times y}{x}$.
Il n'y a pas besoin de faire des conversions puisqu'on divise des cm par des cm ; le résultat est alors en μm.

2 On voit que ces deux cellules possèdent un noyau individualisé. La cellule végétale possède une vacuole, organite coloré. Dans le cytoplasme de la cellule animale, on voit des organites, petits grains plus sombres. Or on sait que les cellules eucaryotes sont des cellules compartimentées avec des organites et un noyau individualisé délimité par une enveloppe nucléaire. On en déduit donc que ces deux cellules sont des cellules eucaryotes.

3 Cette cellule possède une vacuole et elle est entourée par une paroi. On peut donc dire que c'est une cellule végétale.

4 Sous chaque photo, le microscope utilisé est indiqué par les lettres « MO », elles ont donc été observées avec un microscope optique appelé aussi microscope photonique.

5 Dans une cellule bactérienne, on aurait pu voir un cytoplasme, de l'ADN, et une membrane plasmique la délimitant.

6 Le microscope électronique permet de grossir davantage que le microscope optique. Avec le MO on n'aurait pas pu voir les éléments à l'intérieur du cytoplasme. Il aurait donc fallu utiliser un microscope électronique.

7 La théorie cellulaire indique que tous les êtres vivants sont constitués d'au moins une cellule et que ces cellules présentent une structure commune. Ces photos montrent des observations de différents tissus, issus d'animaux ou de végétaux. On voit que, malgré leur diversité, tous ces organismes sont constitués de plusieurs cellules, qui sont délimitées par une membrane et contiennent de l'ADN. On sait que les cellules bactériennes présentent elles aussi cette même organisation. Ces observations confirment donc une partie de la théorie cellulaire.

3 Les liposomes à la rescousse

Enoncé p. 74

Lycée Lavoisier, Paris

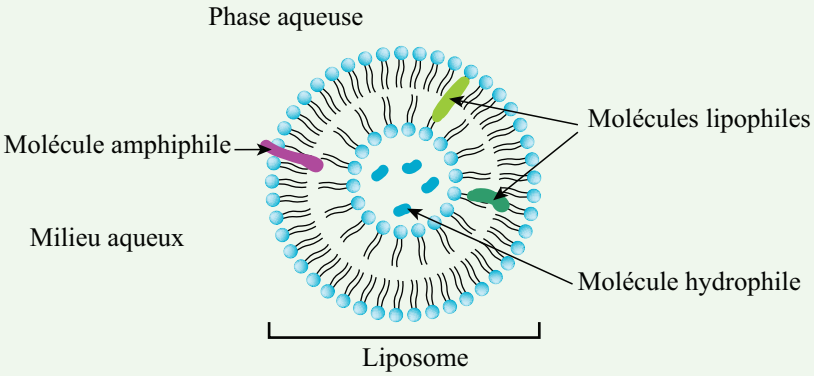
1 La structure qui permet de transporter un principe actif hydrophile doit avoir deux propriétés :

- Elle doit pouvoir englober le principe actif pour qu'il reste dans la structure ; donc cela ne peut être que la structure 1 ou la structure 2.
- Le principe actif est hydrophile, il faut donc qu'il soit en contact avec des parties hydrophiles de la structure.

Parmi les structures 1 et 2, il s'agit de la 1, dont les têtes hydrophiles des phospholipides internes sont placées vers l'intérieur de la structure.

Pour ces deux raisons, il s'agit du liposome.

2 Voici la représentation d'un liposome en milieu aqueux :



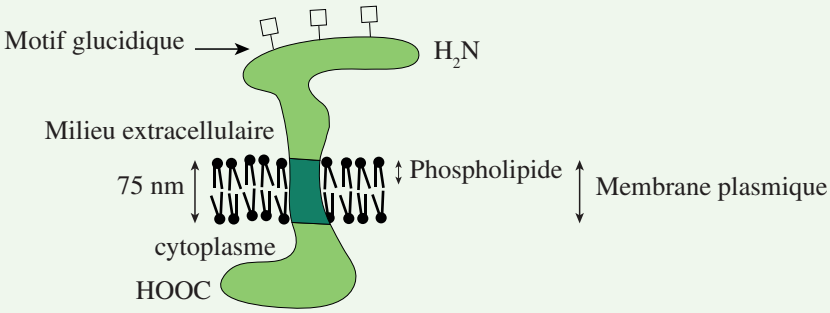
4 Localisation d'une protéine membranaire

Enoncé p. 75

Lycée Pasteur, Neuilly

On sait que la membrane est une bicouche de phospholipides mesurant 75 nm d'épaisseur. On voit que la partie centrale vert foncé est hydrophobe : elle sera donc enchassée dans la bicouche de phospholipides. Les deux autres parties, vert clair, sont hydrophiles, donc elles seront en dehors de la membrane. Le texte explique que seule la partie NH_2 extracellulaire porte des motifs glucidiques. La partie intracellulaire est l'extrémité COOH de la protéine.

On peut donc représenter la glycophorine dans la membrane plasmique d'une hématie de cette façon :



5 L'exocytose de neurotransmetteurs

Enoncé p. 76

Lycée Montaigne, Bordeaux

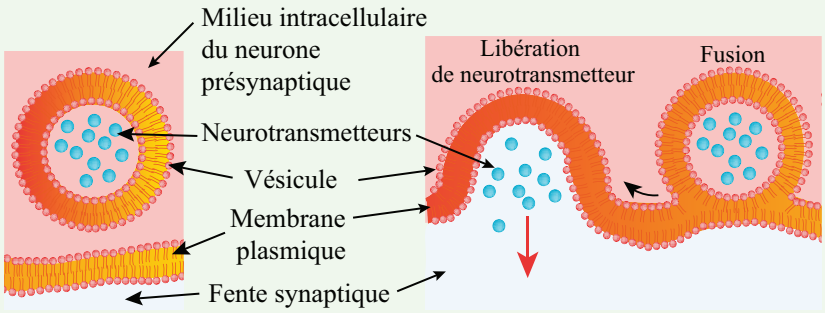


Schéma du stade A

Schéma du stade B

6 Pasteur vs Pouchet

Enoncé p. 78

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 D'après le document 1, il faut plus de 120 °C pour qu'il n'y ait plus de bacille vivant suite à une ébullition. Donc, même si Pouchet a fait bouillir de l'eau de foin à 100 °C, les endospores n'ont pas été détruites. Elles ont pu germer comme écrit dans le document 3 et redonner des cellules actives.

2 Ce n'est qu'entre 1872 et 1876 que Cohn a trouvé que des bacilles pouvaient produire des endospores, formes de résistance. Pouchet ne connaissait donc pas l'existence des endospores. Il a utilisé de l'eau de foin pouvant contenir des micro-organismes. Comme Pasteur, il a porté à ébullition cette eau de foin. Il a alors cherché à tuer les micro-organismes par usage d'une forte température. Et comme Pasteur, il a fait en sorte que l'eau bouillie ne soit pas en contact avec l'air, pour éviter de faire entrer des micro-organismes. Donc, selon son protocole, si une forme de vie se développait, ce serait parce qu'elle serait apparue spontanément à partir de l'eau de foin. Or, c'est ce que Pouchet observa. Donc, il est normal qu'il ait pu conclure, en fonction des connaissances au moment de son expérience, que la thèse de la génération spontanée était valide.

3 Il aurait fallu vérifier que le verre ne contenait pas d'endospore en le portant à plus de 120 °C assez longtemps, et faire de même avec de l'eau pure avec ajout de matière nutritive portée aussi à plus de 120 °C. Pourchet aurait dû éviter d'utiliser de l'eau de foin, car celle-ci peut contenir des endospores (c'est ce que préconisa Pasteur à Pouchet). Le reste de l'expérience est correct : éviter tout contact avec l'air après ébullition, ou tout objet potentiellement contaminé.

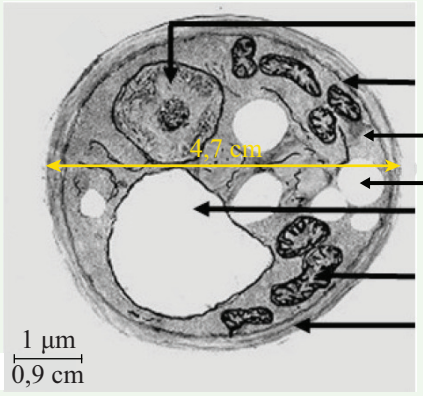
CORRIGÉS

7 Les levures, champignons unicellulaires

Enoncé p. 79

Lycée Montaigne, Bordeaux

1



Noyau
Membrane plasmique
Cytoplasme
Goutelettes de gras
Vacuole
Mitochondrie
Paroi (fongique)

2 On utilise la méthode vue précédemment (voir exercice 2 page 73).

Objet	Taille sur la photo (en cm)	Taille réelle (en μm)
Échelle	0,9	1
Cellule	4,7	?

$$\text{taille à calculer} = \frac{4{,}7 \times 1}{0{,}9} = 5{,}2\ \mu\text{m}.$$

Donc cette cellule mesure en réalité 5,2 μm.

3 On voit que cette cellule possède un cytoplasme compartimenté. Chaque compartiment est limité par une ou deux membranes. De plus, le matériel génétique est enfermé par une enveloppe nucléaire. Or, on sait qu'une cellule eucaryote possède des organites, compartiments cellulaires, et un vrai noyau. On en déduit que cette cellule est bien eucaryote.

4 Il est précisé dans le texte que la paroi de la levure est composée de chitine et non de cellulose, comme des cellules végétales. De plus, les levures ne contiennent pas de plastes (chloroplastes). Ce ne sont donc pas des cellules végétales.

8 Les algues font bande à part

Enoncé p. 80

Lycée Lavoisier, Paris

1 En analysant le tableau 3.2 du document 4, on voit que les algues rouges n'ont pas les mêmes pigments principaux que les espèces d'algues vertes. De plus, elles ont des pigments que les algues vertes n'ont pas et leurs cellules reproductrices sont sans flagelle. Or, d'après le texte introductif, pour faire partie d'un même groupe évolutif, il faut des caractères partagés (en commun) et pour être plus proche d'une autre groupe il faut avoir le plus de points communs possibles. Donc, vu les caractères des

algues rouges non partagés avec les algues vertes, on peut affirmer que les algues rouges forment un groupe à part.

De plus, on voit dans le tableau du document 4 que les algues vertes et les plantes vertes ont les mêmes chlorophylles, en plus d'avoir des chloroplastes à deux membranes et des xanthophylles et du bêtacarotène. Ce n'est pas le cas pour les algues rouges qui ont juste des chloroplastes à deux membranes comme caractère commun. Ainsi, les plantes terrestres ont plus de caractères en commun avec les algues vertes. Donc algues vertes et plantes terrestres sont les plus proches, elles ont un ancêtre commun plus récent.

Pour autant, les cellules reproductrices sont différentes entre algues vertes et plantes terrestres, donc cela justifie que plantes terrestres et algues vertes soient séparées dans la classification.

2 On cherche des arguments en faveur de l'endosymbiose, puis à proposer quel type de procaryote a pu être phagocyté dans le cas des algues vertes d'une part et des algues rouges d'autre part.

- *Argument en faveur de l'endosymbiose.*
  On voit dans le document 3 que s'il y a eu endosymbiose, il y a eu internalisation d'une cellule. Alors, cette cellule serait douée de photosynthèse, posséderait son ADN et aurait deux membranes (la sienne et une provenant de la cellule l'ayant phagocytée). Or, dans le document 4, on voit que les différents types d'algues et les plantes ont des chloroplastes ayant un matériel génétique de type bactérien et deux membranes. Les trois critères sont donc remplis pour dire qu'il y a eu internalisation d'une cellule par une autre cellule. Donc l'endosymbiose est plausible.
  Mais quel genre de cellule aurait été internalisée ?
- *Cellule internalisée chez les algues vertes et rouges.*
  On voit dans le document 4 que les cyanobactéries ont des pigments qu'on retrouve dans les chloroplastes des algues rouges : phycocyanine, allophycocyanine, et phycoérythrine. De même, on trouve les mêmes pigments chlorophylliens dans les prochlorophytes et les chloroplastes d'algues vertes. Or, s'il y a eu internalisation d'une cellule photosynthétique, d'après le document 3, alors la cellule phagocytée doit avoir récupéré les caractères de la cellule internalisée dont ses pigments, mais ceux-ci ne seraient que dans la structure à double membrane (organite). Donc, a priori, une cellule eucaryote (ancestrale) aurait phagocyté des prochlorophytes et serait à l'origine des algues vertes. Mais une autre cellule (ancestrale) aurait phagocyté une cyanobactérie et serait à l'origine des algues rouges.

Conclusion : la présence de deux membranes et d'ADN bactérien dans les chloroplastes sont deux arguments en faveur de la théorie endosymbiotique. De plus, vu les pigments retrouvés dans les chloroplastes, une

cellule eucaryote (ancestrale) aurait phagocyté des prochlorophytes d'une part et serait à l'origine des algues vertes. Mais une autre cellule (ancestrale) aurait phagocyté une cyanobactérie et serait à l'origine des algues rouges.

9 Aux limites du vivant : les virus

Enoncé p. 83

1 D'après les informations du texte et d'après mes connaissances, présentons les caractéristiques comparées d'un adénovirus et d'une cellule sous la forme du tableau suivant :

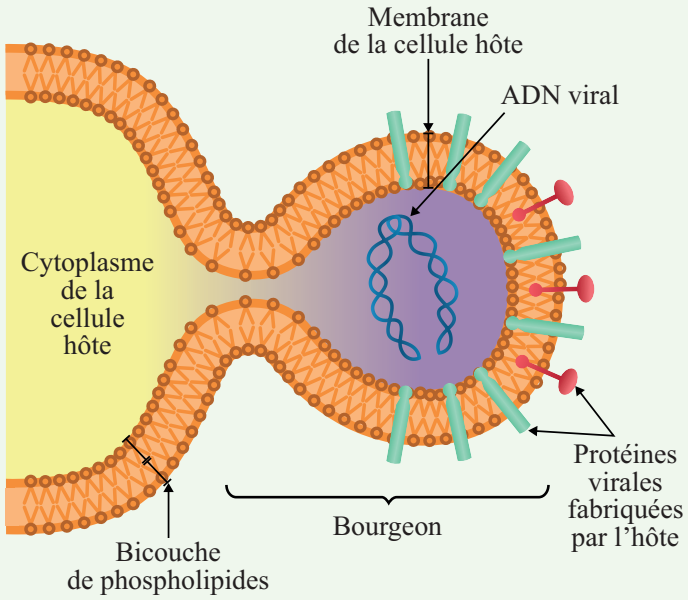
Élément étudié / Échelle d'observation	Adénovirus	Cellule
Échelle moléculaire	Présence d'ADN Pas de machinerie cellulaire	ADN, molécule universelle des êtres vivants Machinerie cellulaire permettant la fabrication de molécules à partir de l'ADN
Échelle cellulaire	Particule délimitée par une membrane plasmique. Incapable de s'autoreproduire sans cellule hôte.	Cellule délimitée par une membrane plasmique Toute cellule est issue d'une autre cellule par division cellulaire

2 On cherche les arguments en faveur de la théorie cellulaire.

On voit que les virus contiennent de l'ADN comme toutes les cellules vivantes. En outre, le virus est délimité par une membrane plasmique comme toutes les cellules. Ces arguments moléculaires permettent de classer les virus parmi les êtres vivants.

D'autres arguments, à l'inverse, sont plutôt favorables à l'idée que les virus ne sont pas des êtres vivants. Un adénovirus ne peut pas se reproduire seul, il a besoin de la machinerie cellulaire d'une cellule hôte pour se reproduire. Il ne provient pas d'un autre virus par division. Or, d'après la théorie cellulaire, un être vivant possède au moins une cellule, et une cellule provient d'une autre cellule par division. Donc l'adénovirus n'ayant pas de cellule capable de s'autoreproduire, ne semble pas être un être vivant.

3 Quand les nouveaux virus sont libérés par la cellule hôte, ils sont expulsés grâce à un mécanisme de bourgeonnement. La sortie de la cellule hôte est illustrée par le schéma suivant :



Ce mécanisme explique que la membrane du virus est un morceau de la membrane plasmique de la cellule hôte. Ces deux membranes ont donc la même composition et la même structure.

Deuxième partie

LE SOLEIL, UNE SOURCE D'ÉNERGIE

Chapitre 4

Le rayonnement solaire

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Origine de l'énergie dégagée par le Soleil
3. Rayonnement du Soleil et température de surface
4. Énergie solaire reçue sur Terre

1 Introduction

Situé à 150 millions de kilomètres de notre planète, le Soleil est une étoile (c'est-à-dire un astre rayonnant sa propre lumière), autour de laquelle les planètes du système solaire gravitent. Il fournit à la Terre l'essentiel de son énergie, qui est exploitée directement ou indirectement par l'Homme. Aujourd'hui, les scientifiques sont capables d'étudier les rayonnements solaires. Ils peuvent également déterminer précisément la température à la surface du Soleil et décrire les réactions qui se produisent dans l'étoile.

PROBLÉMATIQUE

Comment le Soleil produit-il de l'énergie et comment cette énergie se répartit-elle sur Terre ?

2 Origine de l'énergie dégagée par le Soleil

Une étoile comme le Soleil se forme à partir de la compaction gravitaire de certains gaz et poussières. Lorsque la masse de cette compaction est suffisante, il se produit des réactions de fusions nucléaires qui consomment des noyaux d'hydrogène pour produire des noyaux d'hélium (voir chapitre 1). Cette réaction s'accompagne de la libération d'une très grande quantité d'énergie, qui permet au Soleil de conserver des températures très élevées, pouvant atteindre 15 millions de degrés en son centre.

Retrouvez une vidéo du CEA sur la fusion dans les étoiles avec live!

En 1905, Einstein affirme qu'il est possible de transformer de la masse en énergie. C'est ce qui se passe dans le Soleil : sa masse diminue à chaque instant pour créer de l'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques, sources de lumière et de chaleur.

COURS

L'équivalence entre la masse perdue et l'énergie produite est donnée par la formule d'Einstein :

$$E = \Delta m \times c^2,$$

où E est l'énergie produite en joules (J), Δm la perte de masse en kilogrammes (kg) et c la célérité de la lumière dans le vide qui vaut $3{,}00.10^8$ m.s^{-1}.

La célérité de la lumière étant constante, l'énergie produite et la masse perdue sont donc proportionnelles.

On rappelle que l'énergie et la puissance d'un système sont liés par la relation :

$$E = P \times \Delta t,$$

où E est l'énergie produite en joules (J), P la puissance du système en watts (W), et Δt le temps écoulé en secondes (s).

Application : sachant que la fusion des noyaux d'hydrogène dans le Soleil produit une puissante radiative de $P = 4.10^{26}$ W, on peut en déduire la variation de masse du Soleil à chaque seconde donnée par la formule :

$$\Delta m = \frac{P \times \Delta t}{c^2}$$

Application numérique :

$$\Delta m = \frac{4.10^{26} \times 1}{(3{,}00.10^8)^2} = 4.10^9 \text{ kg}.$$

Soit 4 millions de tonnes par secondes.

À RETENIR

L'énergie libérée par les réactions de fusion nucléaire qui se produisent dans les étoiles les maintient à une température très élevée. Du fait de l'équivalence masse-énergie, donnée par la formule $E = \Delta m \times c^2$, les réactions de fusions nucléaires s'accompagnent d'une diminution de la masse solaire au cours du temps.

Voir exercice 9 page 106.

3 Rayonnement du Soleil et température de surface

L'énergie produite dans les étoiles est émise sous forme de rayonnements électromagnétiques qui voyagent à travers l'espace. Les rayonnements issus du Soleil arrivent jusqu'à la Terre, lui apportant lumière et chaleur.

Il existe différents types de rayonnements électromagnétiques caractérisés par une grandeur appelée longueur d'onde et notée λ.

La lumière correspond à une petite partie des ondes électromagnétiques, celles qui sont visibles par l'Homme. Dans le domaine visible, chaque couleur (et même chaque nuance de couleur) correspond à une longueur d'onde différente. Les longueurs d'onde du domaine visible sont comprises entre 400 et 800 nm.

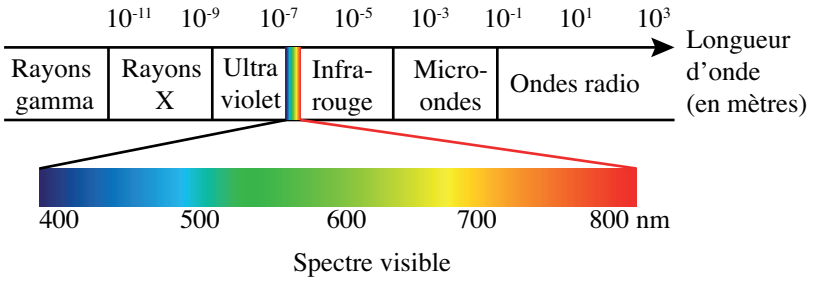


Figure 4.1 – Domaines du rayonnement électromagnétique

Les étoiles n'émettent pas toutes les longueurs d'ondes avec la même intensité. Il existe toujours une longueur d'onde particulière, notée λ_{max}, qui correspond à l'émission maximale.

Pour une étoile donnée, il est possible de représenter l'intensité d'émission du rayonnement en fonction de la longueur d'onde. Cette courbe est appelée « spectre » ou « profil spectral ». Elle permet de déterminer graphiquement λ_{max}.

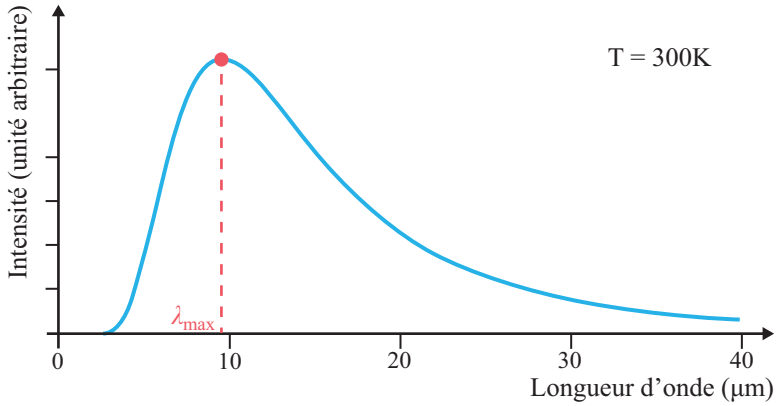


Figure 4.2 – Exemple de spectre et détermination graphique de λ_{max}

On peut modéliser cette courbe en considérant que l'on peut assimiler l'étoile à ce qu'on appelle un « corps noir » , c'est-à-dire un objet théorique qui serait capable d'absorber toute l'énergie électromagnétique reçue sans la diffuser ni la réfléchir. Cette énergie serait alors réémise en suivant une loi appelée « spectre du corps noir ».

COURS

Si l'on utilise cette modélisation, le profil spectral d'une étoile ne dépend alors que de la température à la surface de cette étoile.

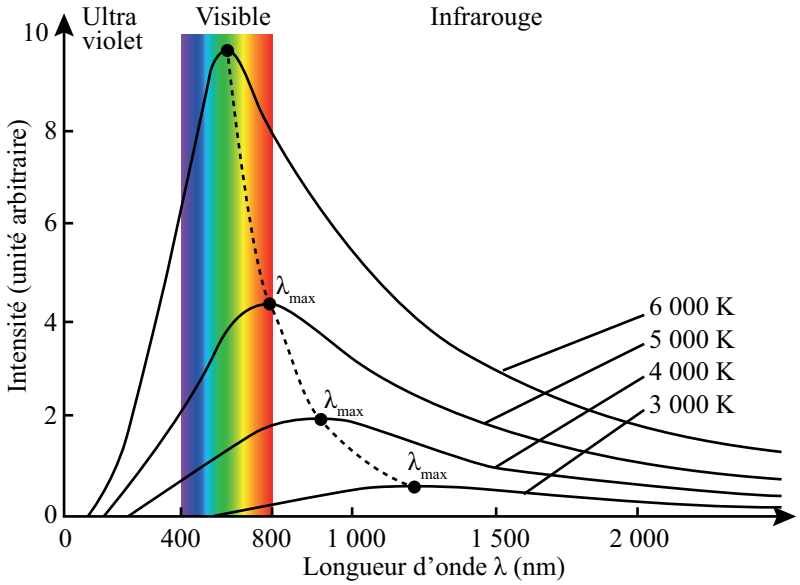


Figure 4.3 – Profil spectral d'un corps noir à différentes températures en kelvins (K)

On voit que plus la température T de l'étoile diminue, plus la valeur de λ_{max} de cette étoile augmente (le maximum de la courbe se décale vers la droite). Cette observation correspond à une loi appelée *loi de Wien* :

Définition 1

Loi de Wien : la température absolue T à la surface d'une étoile est inversement proportionnelle à la longueur d'onde d'émission maximale λ_{max}.

$$T = \frac{\text{constante}}{\lambda_{max}}$$

où λ_{max} est exprimée en mètre et T en kelvins.
La constante vaut $2{,}898.10^{-3}$ m.K.

Remarque : la température absolue T en kelvins est reliée à la température θ en degrés par la relation $T(\text{K}) = \theta\ (°\text{C}) + 273$.

Conséquence : plus la température absolue de surface d'une étoile est importante, plus la longueur d'onde à laquelle elle émet son maximum de rayonnement est faible.

Ainsi, les étoiles émettant un rayonnement de couleur bleue ont une température de surface plus grande que les étoiles émettant un rayonnement rouge, dont la longueur d'onde est plus grande, cf. figure 4.3.

COURS
INTERROS
CORRIGÉS

Voir exercice 4 page 103.

À RETENIR

Les étoiles émettent des ondes électromagnétiques de plusieurs longueurs d'onde. Le spectre (ou profil spectral) de ces rayonnements ne dépend que de la température de surface de l'étoile.
D'après la loi de Wien, cette température est inversement proportionnelle à la longueur d'onde au maximum d'émission.

4 Énergie solaire reçue sur Terre

4.1 Variations selon l'angle d'incidence

La puissance des rayonnements reçus du Soleil dépend de l'angle entre les rayons du Soleil et la surface de la Terre à l'endroit considéré.

En effet, si l'on considère l'énergie contenue dans un cylindre de diamètre donné, on voit qu'une même quantité d'énergie est répartie sur une surface plus ou moins grande en fonction de l'inclinaison de la surface terrestre par rapport à ce cylindre.

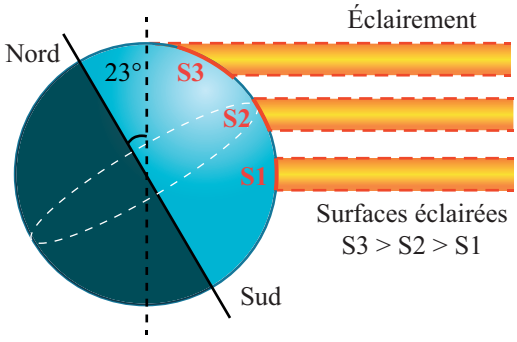


Figure 4.4 – Énergie solaire reçue sur Terre en fonction de l'incidence des rayons

Plus l'inclinaison est grande, moins il y aura d'énergie par unité de surface : il fera donc plus froid au niveau de la surface S3 qu'au niveau de la surface S1.

On utilise souvent la notion de puissance surfacique qui correspond à l'énergie déposée chaque seconde par unité de surface. Cette grandeur, souvent notée P_S , s'exprime en $W.m^{-2}$.

L'inclinaison entre les rayons du Soleil et la surface de la Terre dépend de plusieurs paramètres :

COURS

- de la latitude. On parle de *zonation climatique*. La puissance reçue est maximale à la latitude où les rayons solaires sont perpendiculaires à la surface de la Terre.
- de l'heure de la journée. On parle alors de *variation diurne*. Au cours de la journée, le Soleil n'est pas toujours à la même position dans le ciel. La puissance solaire reçue est maximale lorsque le Soleil est au plus haut (midi heure solaire).
- du moment de l'année. On parle alors de *variation saisonnière*. Au cours de l'année, la Terre se déplace sur son orbite mais son axe de rotation reste toujours parallèle à lui même. Selon la position de la Terre, la quantité d'énergie reçue à un endroit donné sera différente. Dans l'hémisphère nord, la puissance solaire reçue est plus grande en été qu'en hiver. Dans l'hémisphère sud, c'est l'inverse.

Voir exercice 10 page 107.

À RETENIR

La puissance radiative reçue du Soleil par une surface plane est proportionnelle à l'aire de la surface et dépend de l'angle entre la normale à la surface et la direction du Soleil.

La puissance solaire reçue par unité de surface terrestre dépend :

- de l'heure (variation diurne) ;
- du moment de l'année (variation saisonnière) ;
- de la latitude (zonation climatique).

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 110

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 La forte température au cœur des étoiles est due :

a à la fission des atomes sous forte pression ;

b à la fission des atomes sous faible pression ;

c à la fusion des atomes sous forte pression ;

d à la fusion des atomes sous faible pression.

2 L'énergie libérée par un corps de puissance P s'exprime par :

a $E = P \times \Delta t$;

b $E = \dfrac{P}{\Delta t}$;

c $E = \dfrac{\Delta t}{P}$.

3 La perte de masse d'une réaction nucléaire s'exprime par :

a $\Delta m = E \times c^2$;

b $\Delta m = \dfrac{E}{c^2}$;

c $\Delta m = \dfrac{c^2}{E}$.

4 Les étoiles émettent des ondes :

a électromagnétiques ;

b sonores.

5 L'ordre de grandeur des longueurs d'onde du visible est :

a le nanomètre ;

b le millimètre ;

c le dixième de micromètre.

6 La température de surface d'une étoile est :

a proportionnelle à la longueur d'onde d'émission maximale ;

b proportionnelle au carré de la longueur d'onde d'émission maximale ;

c inversement proportionnelle à la longueur d'onde d'émission maximale.

INTERROS

7 Sachant, qu'un four chauffe maximum à 300 °C, quelle est la valeur de cette température en kelvin ?

[a] 573 K ;

[b] 27 K ;

[c] 1 K.

8 Plus la longueur d'onde d'émission maximale est importante,

[a] plus le corps est chaud ;

[b] plus le corps est froid ;

[c] plus le corps est comprimé.

9 Une étoile rouge est, d'après la loi de Wien :

[a] plus chaude qu'une étoile bleue ;

[b] plus froide qu'une étoile bleue ;

[c] de même température qu'une étoile bleue.

10 La répartition des climats s'explique par :

[a] l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre ;

[b] la surface sphérique de la Terre ;

[c] l'éloignement entre la surface et le Soleil.

11 Les saisons sont dues à :

[a] l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre ;

[b] la surface sphérique de la Terre ;

[c] l'éloignement entre la surface et le Soleil.

12 S'il fait plus chaud en été à Londres, c'est parce que :

[a] l'angle d'incidence est plus fort qu'en hiver ;

[b] l'angle d'incidence est plus faible qu'en hiver ;

[c] la surface éclairée est plus grande qu'en hiver.

2 Une étoile au régime

★ 10 min Corrigé p. 110

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

L'âge du Soleil est évalué à 4,6 milliards d'années. Depuis sa formation, il ne cesse de se dérouler des réactions thermonucléaires en son centre, donnant lieu à la nucléosynthèse, formation de nouveaux noyaux. Ces réactions dégagent de l'énergie entraînant une diminution de sa masse.

1 Sachant que la puissance radiative du Soleil est de $P = 3{,}9.10^{26}$ W, calculer l'énergie produite par le Soleil depuis sa formation.

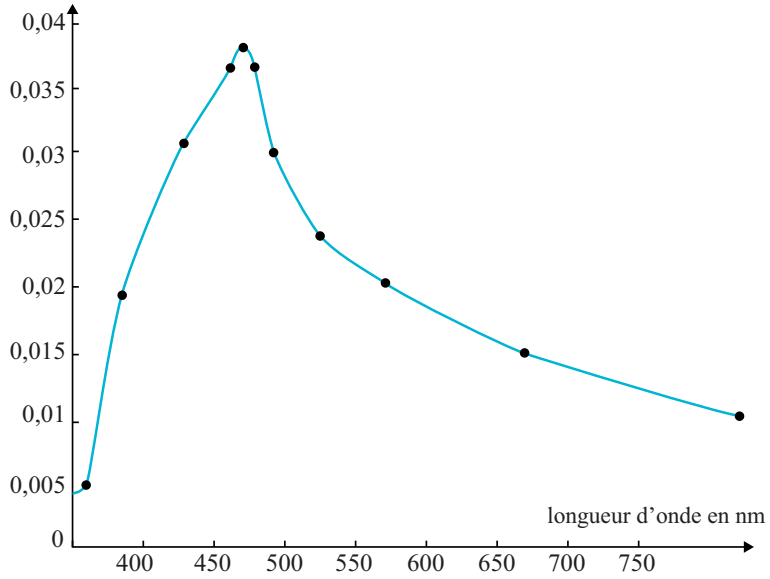
2 Calculer alors la masse perdue par le Soleil depuis sa création.

3 Profil spectral d'une étoile

★ 10 min Corrigé p. 111

Lycée Saint-Esprit, Beauvais

Voici le profil spectral de l'étoile Canopus, dont la température de surface est évaluée à 6 100 K.



1. Déterminer graphiquement la longueur d'onde d'émission maximale, λ_{max}.
2. Cette longueur d'onde appartient-elle au domaine du visible ? Justifier.
3. Vérifier par un calcul la température de surface de Canopus.

On rappelle la loi de Wien :

$$T = \frac{k}{\lambda_{max}},$$

où $k = 2{,}9.10^{-3}$ m.K.

4 Comparaison des étoiles

★ 10 min Corrigé p. 111

Lycée Saint-Martin, Rennes

À partir du profil spectral de cinq étoiles : le Soleil, Deneb, Alnilam, Atria et Bételgeuse, on a déterminé leur longueur d'onde d'émission maximale, λ_{max} qu'on a référencé dans le tableau suivant :

Étoile	Soleil	Deneb	Alnilam	Atria	Bételgeuse
λ_{max} (nm)	500	310	110	630	905

1. Indiquer les étoiles pour lesquelles λ_{max} appartient au domaine du visible.

2 D'après ces données, justifier quelle est l'étoile la plus chaude.

3 D'après ces données, justifier quelle est l'étoile la plus froide.

5 Température des étoiles

★ 5 min Corrigé p. 112

Lycée Janson de Sailly, Paris

Le spectre de la plupart des étoiles est un spectre continu (auquel se superposent des raies sombres). On peut démontrer que le maximum d'émission du spectre a lieu à une longueur d'onde inversement proportionnelle à la température de surface des étoiles.

1 Comment s'appelle la loi qui traduit cette propriété ?

2 Expliquer pourquoi une étoile plus chaude que le Soleil apparaît de couleur bleue.

3 Expliquer pourquoi une étoile plus froide que le Soleil apparaît de couleur rouge.

6 Constellation d'Orion

★ 5 min Corrigé p. 112

Lycée Périer, Marseille

On s'intéresse à deux étoiles caractéristiques de la constellation d'Orion : Rigel et Bételgeuse. L'une est de couleur bleue, alors que l'autre est de couleur rouge.

D'après leur profil spectral, on détermine la longueur d'onde d'émission maximale λ_{max} pour chacune des deux étoiles :

Étoile	Rigel	Bételgeuse
λ_{max} (nm)	285	905

1 Calculer la température de surface de chacune de ces étoiles.

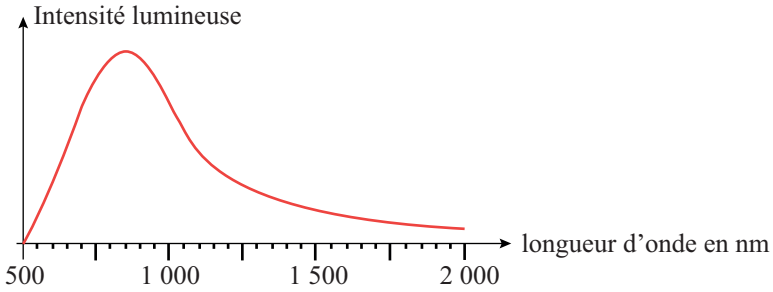
2 Attribuer à chaque étoile sa couleur.

7 Lampe halogène

★ 10 min Corrigé p. 113

Lycée Claude Bernard, Paris

On donne la courbe d'émission d'une lampe « halogène ».



1 Déterminer graphiquement la longueur d'onde d'émission maximale.

2 Cette longueur d'onde appartient-elle au domaine visible ? Justifier.

3 On rappelle la loi de Wien :

$$T = \frac{k}{\lambda_{max}}$$

où $k = 2{,}9.10^{-3} m.K$.

En appliquant la loi de Wien, déterminer la température de la lampe.

4 En changeant légèrement la tension d'alimentation de la lampe, on s'aperçoit que le maximum d'émission se déplace vers une longueur d'onde plus grande.

Conclure sur la température de la lampe : a-t-elle augmenté ou diminué ?

8 Étude d'une étoile par sa couleur ★★

15 min — Corrigé p. 113

Lycée Berlioz, Vincennes

Arcturus est une étoile située dans la constellation du Bouvier. Son profil spectral est donné ci-dessous :

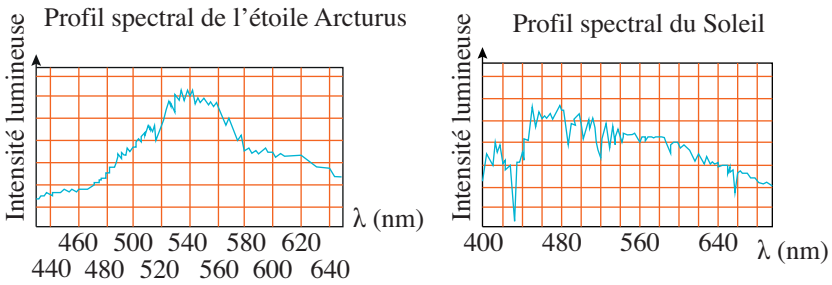


Figure 4.5 – Pofil spectral d'Arcturus et du Soleil

1. Évaluer la longueur d'onde de la radiation pour laquelle l'intensité lumineuse est maximale.
2. En déduire la température de cette étoile en °C. On rappelle que : T (en K)$= \theta$ (en °C)$+273$.
3. Préciser si Arcturus est plus chaude ou plus froide que le Soleil. Justifier.

9 Durée de vie du Soleil

★★★ 20 min Corrigé p. 114

Lycée Clémenceau, Nantes

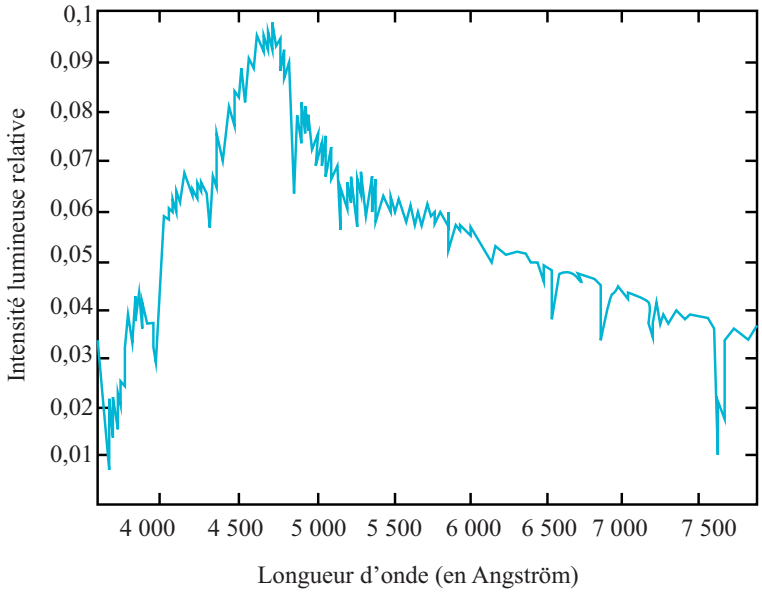
Le Soleil, cette étoile qui nous envoie tant d'énergie et permet à notre Terre de se maintenir à une quinzaine de degrés Celsius, va un jour s'éteindre. C'est le destin de chaque étoile.

On estime que seulement 10 % de sa masse possède une température suffisamment importante pour établir des fusions nucléaires et que seulement 0,7 % de la masse va pouvoir fournir de l'énergie thermique.

Données :

- Age : $4{,}6.10^{9}$ ans ;
- Masse : 2.10^{30} kg ;
- $P_{\text{radiative}} = 3{,}9.10^{26}$ W ;
- Température au centre : 15.10^{6} K ;
- 1 Angström $= 10^{-10}$ m.

On donne ci-dessous le profil spectral du Soleil.



1. Déterminer la masse du Soleil susceptible d'être transformée en énergie par réaction thermonucléaire.
2. Estimer la durée de vie restante du Soleil.
3. Déterminer la longueur d'onde d'émission maximale, λ_{max} en m.
4. Donner le domaine électromagnétique auquel appartient cette longueur d'onde.
5. Calculer la température de surface du Soleil.

10 Puissance solaire au solstice d'été ★★

20 min Corrigé p. 115

Lycée du Parc, Lyon

Ville	Latitude (arrondie au degré près)	Durée de la journée le 21/06	Hauteur du Soleil à midi le 21/06
Lille	50°	16 h 15	63°
Paris	48°	15 h 48	65°
Lyon	45°	15 h 32	68°
Marseille	43°	15 h 13	70°
Ajaccio	42°	15 h 03	71°

Paramètres d'ensoleillement de certaines villes.

1. Tracer les graphiques de la durée de la journée et de la hauteur du Soleil le 21/06 (solstice d'été) en fonction de la latitude.
2. Déduire l'effet de la latitude sur la puissance solaire reçue et la durée du jour au solstice d'été de Lille à Ajaccio. Des schémas sont attendus.

11 Les saisons sur les autres planètes ★★

20 min Corrigé p. 116

Lycée Chaptal, Paris

Vénus a un axe de rotation incliné de 3° et Uranus un axe incliné de 98°. Vénus met 225 jours environ à faire le tour du Soleil et Uranus met 84 ans. Vénus met 243 jours à tourner sur elle-même (c'est la durée d'une journée sur Vénus !) et Uranus met 17 h 14 min.

À partir de vos connaissances sur les conséquences de l'axe de rotation de la Terre sur l'ensoleillement des hémisphères au cours d'une année, proposez les conséquences attendues pour ces deux planètes en vous appuyant sur des schémas explicatifs.

12 Paradoxe Paris-Québec

★★ 20 min Corrigé p. 118

Lycée Lakanal, Sceaux

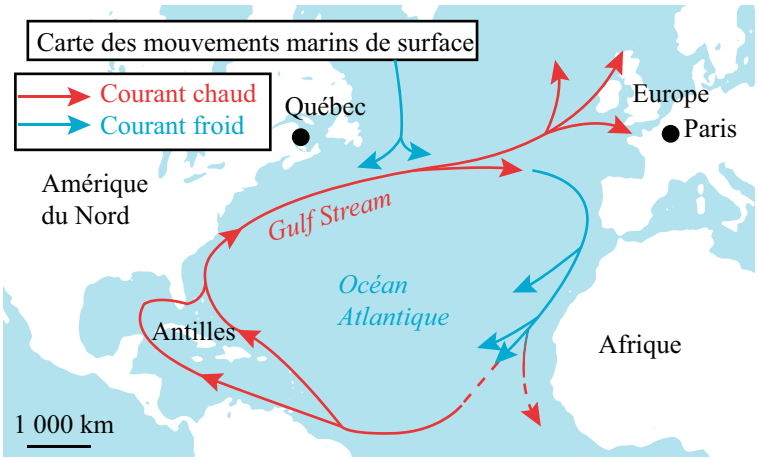
Harry hésite à quitter Paris pour aller s'installer à Québec. Paris (49°N) et Québec (46°N) sont presque à la même latitude pourtant les températures mensuelles sont bien différentes.

Document 1 : Moyenne des températures mensuelles réalisées sur 30 ans.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin
Paris	5	5,6	8,8	11,5	15,3	18,3
Québec	-14,5	-12,3	-5,8	2,6	10,1	15,2

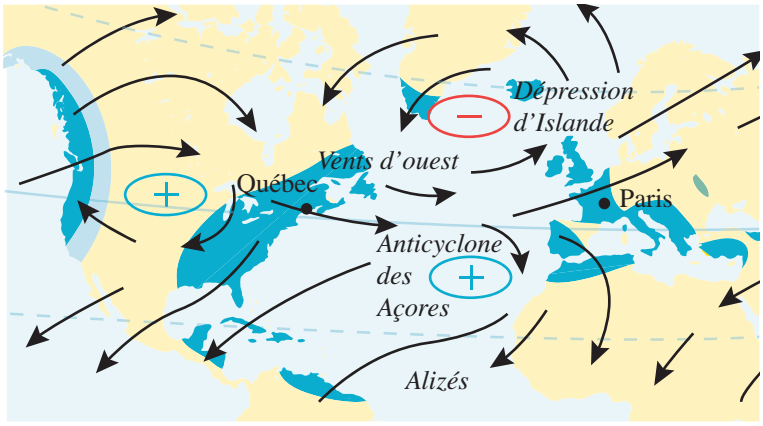
	juillet	août	sept.	octobre	nov.	déc.
Paris	20,5	20,4	16,9	13	8,3	5,5
Québec	17,6	16,3	11,3	5	-2,2	-10,3

Document 2 : Courants océaniques de surface



Voir documents 3 et 4 page suivante.

Document 3 : Extrait de la carte des courants atmosphériques de surface



Document 4 : Lien atmosphère-hydrosphère

Certaines zones du globe ont des pressions atmosphériques plus basses que la normale et d'autres zones ont des pressions plus élevées. Il s'en suit un déplacement des masses d'air des zones de haute pression vers les zones de basses pressions. Du fait de la rotation de la Terre, les vents sont déviés. Le mouvement des vents peut influencer le déplacement des masses d'eau en surface. Celles-ci peuvent aussi être déviées quand elles rencontrent une masse continentale. La chaleur de l'eau peut être transférée à l'air.

1. Calculer les températures moyennes annuelles pour Paris et Québec.
2. À partir de vos connaissances sur l'ensoleillement aux différentes latitudes, expliquez à Harry en quoi ces différences sont paradoxales, puis proposez-lui une explication grâce aux documents 2 à 4.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 101

1 Réponse c.

2 Réponse a.

3 Réponse b.

4 Réponse a.

5 Réponse c. Les ondes appartenant au domaine du visible ont des longueurs d'onde comprises entre 400 nm (violet) et 800 nm (rouge). Leur ordre de grandeur est donc proche de 100.10^{-9} m $= 10^{-7}$ m, c'est-à-dire un dixième de micromètre.

6 Réponse c. T est proportionnelle à $1/\lambda_{max}$.

7 Réponse a. $300 + 273 = 573$ K.

8 Réponse b. Quand λ_{max} augmente alors T diminue puisqu'elles sont inversement proportionnelles.

9 Réponse b.

10 Réponse b.

11 Réponse a.

12 Réponse b.

2 Une étoile au régime

Enoncé p. 102

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 $E = P \times \Delta t$

$= 3{,}9.10^{26} \times (4{,}6.10^{9} \times 365 \times 24 \times 3\,600) = 5{,}66.10^{43}$ J.

En considérant qu'il y a en moyenne 365 j par an, 24 h par jour et 3 600 s dans 1 heure.

2 $\Delta m = \dfrac{E}{c^2}$ donc on a :

$$E = \frac{5{,}66.10^{43}}{(3{,}00.10^{8})^2} = 6{,}3.10^{26} \text{ kg.}$$

Depuis la formation du Soleil, sa masse a diminué de $6{,}3.10^{26}$ kg.

3 Profil spectral d'une étoile

Enoncé p. 103

Lycée Saint-Esprit, Beauvais

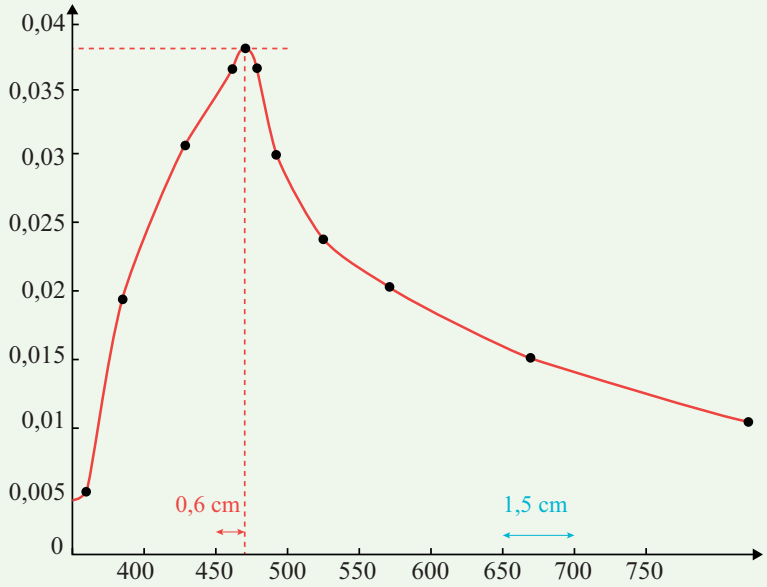


Figure 4.6 – Profil spectral de l'étoile Canopus

1 D'après le graphique on a :

- 1,5 cm correspondent à 50 nm,
- 0,6 cm correspondent à 20 nm.

Donc : $\lambda_{max} = 450 + 20 = 470$ nm.

2 Le domaine du visible s'étend de 400 à 800 nm donc la longueur d'onde précédente appartient au domaine du visible. Elle correspond au violet.

3 D'après la loi de Wien, on a les relations suivantes :

$$T = \frac{2{,}9.10^{-3}\ \text{m.K}}{470.10^{-9}\ \text{m}} = 6\,170\ \text{K}.$$

L'ordre de grandeur correspond bien à la valeur indiquée dans l'énoncé.

4 Comparaison des étoiles

Enoncé p. 103

Lycée Saint-Martin, Rennes

1 Le domaine du visible est compris entre 400 et 800 nm. Les étoiles pour lesquelles λ_{max} appartient au domaine visible sont donc le Soleil et Atria.

2 Quand λ_{max} est faible, la température est forte donc l'étoile la plus chaude est Alnilam.

3 Quand λ_{max} est fort, la température est faible donc l'étoile la plus froide est Bételgeuse.

Étoile	Alnilam	Deneb	Soleil	Atria	Bételgeuse
λ_{max} (nm)	110	310	500	630	905

5 Température des étoiles

Enoncé p. 104

Lycée Janson de Sailly, Paris

1 C'est la loi de Wien.

2 Le Soleil étant une source thermique de couleur jaune-blanc, les étoiles nettement plus chaudes que lui ont une couleur décalée vers les courtes longueurs d'onde dans le spectre visible. Lorsque leur température est suffisamment grande, elles apparaissent bleues.

3 Le raisonnement inverse de la question précédent s'applique : les étoiles plus froides que le Soleil ont une couleur décalée vers les grandes longueurs d'onde du spectre visible par rapport à celui-ci. Lorsque leur température est suffisamment basse, elles apparaissent de couleur rouge.

ANECDOTE

Notons que ce n'est pas un hasard si la longueur d'onde de l'émission maximum du Soleil tombe précisément au milieu de la zone de sensibilité de notre œil (au milieu du spectre de la lumière visible). L'évolution des espèces s'est effectuée de telle manière que l'œil humain (et l'œil de la plupart des espèces) soit plus sensible aux longueurs d'onde où il est le plus sollicité.

6 Constellation d'Orion

Enoncé p. 104

Lycée Périer, Marseille

1 $$T(\text{Rigel}) = \frac{2{,}9.10^{-3}\ \text{m.K}}{285.10^{-9}\ \text{m}} = 10\ 175\ \text{K}$$

$$T(\text{Bételgeuse}) = \frac{2{,}9.10^{-3}\ \text{m.K}}{905.10^{-9}\ \text{m}} = 3\ 204\ \text{K}.$$

2 $\lambda_{max}(\text{Rigel}) < \lambda_{max}(\text{Bételgeuse})$ donc Rigel est bleue et Bételgeuse est rouge.

7 Lampe halogène

Enoncé p. 104

Lycée Claude Bernard, Paris

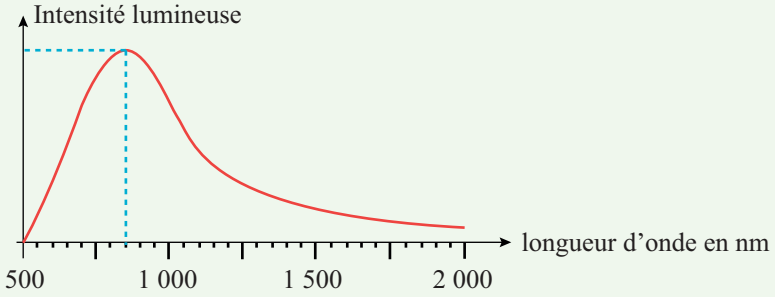


Figure 4.7 – Courbe d'émission d'une lampe « halogène »

1 La longueur d'onde d'émission maximale est de 850 nm.

2 La longueur d'onde, $\lambda_{max} = 850$ nm > 800 nm (rouge) donc elle appartient au domaine de l'infrarouge, pas au domaine du visible.

3 D'après la loi de Wien :

$$T = \frac{2{,}9.10^{-3}}{850.10^{-9}} = 3\,412 \text{ K}.$$

4 La longueur d'onde est plus grande donc la température de la lampe diminue.

8 Étude d'une étoile par sa couleur

Enoncé p. 105

Lycée Berlioz, Vincennes

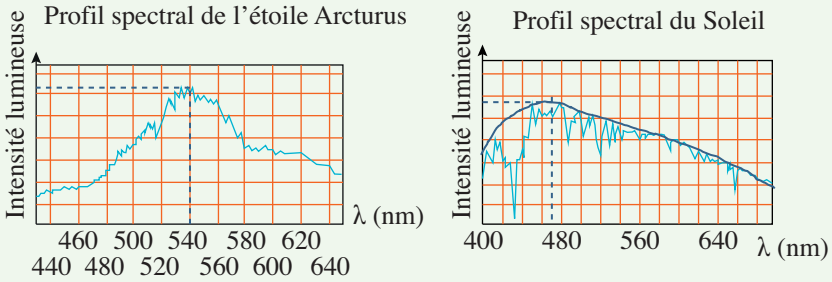


Figure 4.8 – Pofil spectral d'Arcturus et du Soleil

1 La longueur d'onde d'émission maximale est $\lambda_{max} = 540$ nm.

2 On a :

$$T = \frac{2{,}9.10^{-3}}{540.10^{-9}} = 5\,370 \text{ K}.$$

Pour avoir la température en degrés : 5 370–273 = 5 097 °C.

3 λ_{max} (Soleil) = 470 nm. Cette longueur d'onde est inférieure à celle d'Arcturus. Donc Arcturus est plus froide que le Soleil.

9 Durée de vie du Soleil

Enoncé p. 106

Lycée Clémenceau, Nantes

1 Seulement 10 % de la masse du Soleil est susceptible d'entrer en fusion.

$$m = \frac{m(\text{Soleil}) \times 10}{100} = \frac{2.10^{30}\ \text{kg}}{10} = 2.10^{29}\ \text{kg}.$$

De plus, l'énergie est produite par 0,7 % de cette masse.

$$m = \frac{m(\text{Soleil}) \times 0{,}7}{100} = \frac{2.10^{29}\ \text{kg} \times 0{,}7}{100} = 1{,}4.10^{27}\ \text{kg}.$$

2 Cette masse va fournir de l'énergie thermique lors des fusions nucléaires : $E = \Delta m \times c^2$. De plus, cette énergie est reliée à la puissance radiative du Soleil : $E = P \times \Delta t$. Donc, en reliant les deux formules :

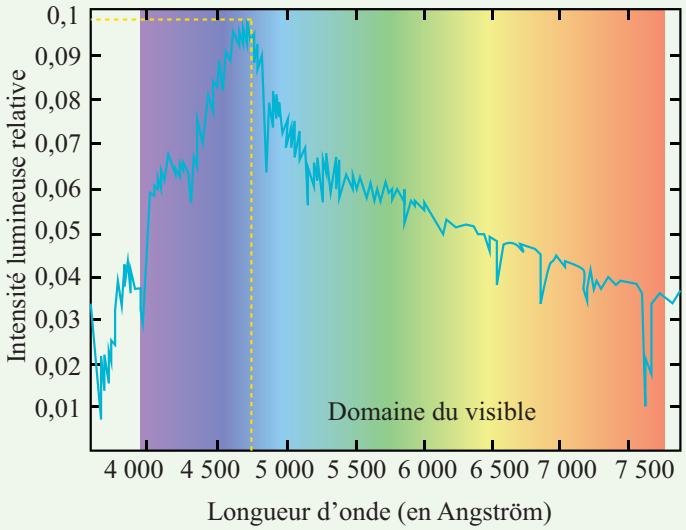
$$\Delta m \times c^2 = P \times \Delta t \implies \Delta t = \frac{\Delta m \times c^2}{P} = \frac{1{,}4.10^{27}\ \text{kg} \times (3.10^8\ \text{m.s}^{-1})^2}{3{,}9.10^{26}\ \text{W}}$$

$$\implies \Delta t = 3{,}2.10^{17}\ \text{s}$$

$$\implies \Delta t = \frac{3{,}2.10^{17}}{365 \times 24 \times 3\,600} = 1.10^{10}\ \text{années}.$$

On estime, en première approximation, la durée restante du Soleil à 10 milliards d'années.

3 La longueur d'onde d'émission maximale, $\lambda_{max} = 4\,750.10^{-10}$ m.



4 Cette longueur d'onde appartient au domaine du visible comme on peut le voir sur le graphique précédent.

5 $T = \dfrac{2{,}9.10^{-3}}{4{,}75.10^{-7}} = 6\,105$ K.

10 Puissance solaire au solstice d'été

Enoncé p. 107

Lycée du Parc, Lyon

1 On obtient le graphique suivant :

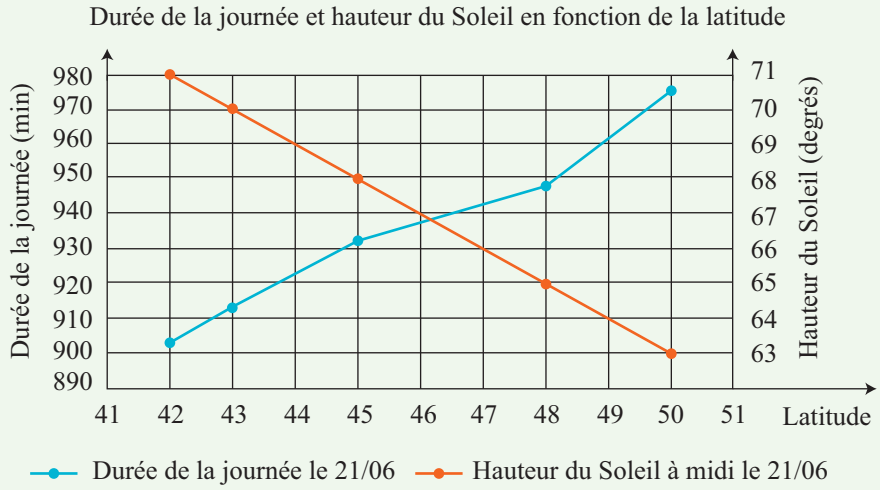


Figure 4.9

2 On a les schémas suivants :

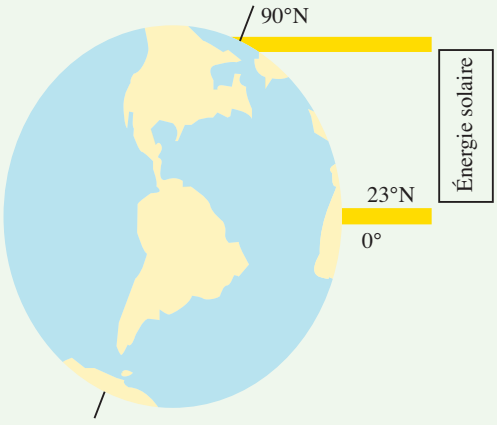


Figure 4.10 – Ensoleillement de l'hémisphère nord au solstice d'été

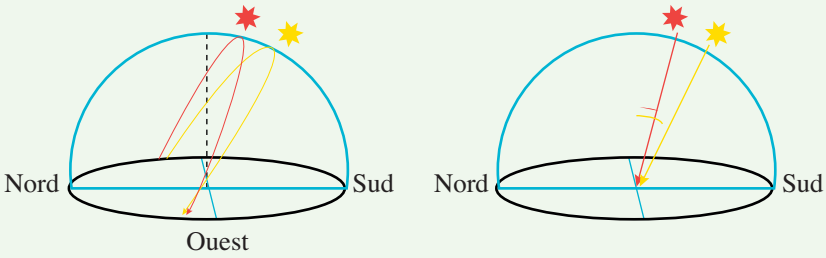


Figure 4.11 – Course du Soleil (à gauche) et angle d'incidence (à droite) pour le cas d'Ajaccio (en rouge) et Lille (en orange)

Le 21 juin, au solstice d'été, les rayons du Soleil à Lille sont inclinés de 63° contre 71° à Ajaccio donc au solstice d'été en France, plus un lieu est à une basse latitude (donc proche du tropique du Cancer), plus le Soleil est haut dans le ciel.

Un même faisceau de puissance solaire P apportera plus de puissance par mètre carré à Ajaccio qu'à Lille, car l'angle d'incidence des rayons diminue quand la latitude diminue.

De plus, la durée du jour diminue en allant de Lille à Ajaccio le 21/06. En France, la durée du jour le 21/06 augmente donc avec la lattitude.

11 Les saisons sur les autres planètes

Enoncé p. 107

Lycée Chaptal, Paris

On cherche à comprendre l'effet de l'inclinaison de l'axe de rotation de Vénus et Uranus.

Cas de Vénus

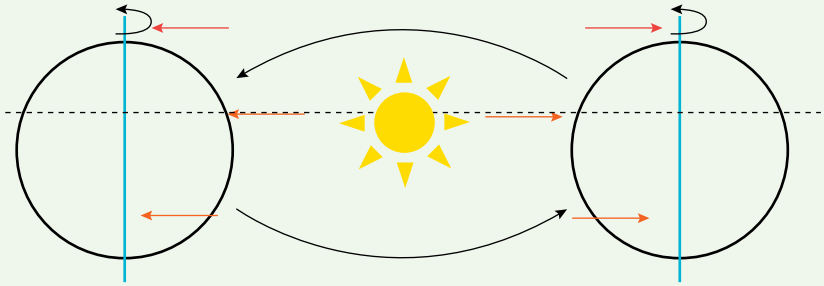


Figure 4.12 – Cas de Vénus pour 2 positions opposées autour du Soleil (en bleu l'axe de rotation)

Vénus a un axe de rotation proche de 0°, donc quelle que soit la position de Vénus sur son orbite (trajet autour du Soleil), les rayons arriveront le

plus perpendiculairement à l'équateur (angle d'incidence proche de zéro), et l'équateur sera tout au long de l'année toujours le mieux exposé, contrairement aux pôles. Il n'y aura donc pas de saison marquées sur Vénus. Il fera toujours plus froid aux pôles et toujours plus chaud à l'équateur et il y aura une alternance jour-nuit toujours de même durée.

Cas d'Uranus

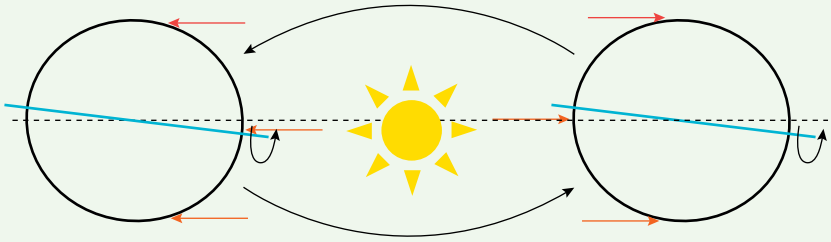


Figure 4.13 – Cas d'Uranus pour 2 positions opposées autour du Soleil (en bleu l'axe de rotation)

Uranus a un axe de rotation proche de 90°, donc quelle que soit la position d'Uranus sur son orbite (trajet autour du Soleil), les rayons arriveront presque parallèlement aux pôles (angle d'incidence proche de 90°). Mais selon la position d'Uranus au cours d'une année, un pôle N recevra les rayons solaires presque perpendiculairement, ce sera l'été au pôle Nord et là où il fait le plus chaud. De plus, ce pôle ne pouvant se retrouver dans la zone non éclairée, il n'y aura pas d'alternance jour-nuit, ce sera toujours le jour pendant 42 ans sans refroidissement nocturne. Ce sera un été extrême. L'autre pôle ne recevra pas de lumière du jour tout au long des journées de 42 ans. Ce sera l'hiver et la nuit en permanence donc un hiver extrême pour le pôle opposé.

Mais 42 ans plus tard (le temps de faire la moitié du trajet autour du Soleil), le pôle Sud sera la zone où les rayons arrivent presque perpendiculairement donc ce sera un été extrême pour le pôle Sud et à l'opposé, hiver extrême pour le pôle Nord.

Remarque : Au cours des 84 ans, la partie la plus éclairée se déplace d'un pôle à l'autre, c'est-à-dire suit globalement la ligne bleue sur le schéma.

Conclusion : sur Vénus, les saisons sont quasiment absentes du fait d'une inclinaison quasiment nulle de l'axe de rotation de la planète. Sur Uranus, les saisons sont extrêmes d'un pôle à l'autre du fait d'un axe de rotation incliné d'environ 90°.

CORRIGÉS

12 Paradoxe Paris-Québec

Enoncé p. 108

Lycée Lakanal, Sceaux

1 La calculatrice donne :

$$\overline{T}_{\text{Paris}} = \frac{5+5{,}6+8{,}8+11{,}5+15{,}3+18{,}3+20{,}5+20{,}4+16{,}9+13+8{,}3+5{,}5}{12}$$
$$= 12{,}4\ ^\circ\text{C}$$
$$\overline{T}_{\text{Quebec}} = \frac{-14{,}5-12{,}3-5{,}8+2{,}6+10{,}1+15{,}2+17{,}6+16{,}3+11{,}3+5-2{,}2-10{,}3}{12}$$
$$= 2{,}8\ ^\circ\text{C}$$

2 On cherche à expliquer les différences de températures moyennes entre Québec et Paris.

On voit que les températures moyennes sont d'environ 10 °C inférieures à Québec par rapport à Paris. Or ces deux villes sont à la même latitude globalement (presque sur le même parallèle), donc elles reçoivent la même puissance solaire au même moment de l'année, et devraient ainsi avoir des températures moyennes très proches. Comment expliquer ce paradoxe ? Comme on le voit dans le document 2, un courant chaud nommé Gulf Stream venant des Antilles remonte et se dirige vers l'Europe. Or les Antilles étant situées au niveau du tropique du Cancer, les eaux transportées par le Gulf Stream vers l'Europe sont chaudes, ce qui, d'après le document 4, réchauffe l'air ambiant de ce continent.

On voit aussi dans le document 3 que des vents viennent du Nord et descendent sur Québec. Or on sait qu'au voisinage du pôle Nord, la puissance reçue du Soleil est faible, donc l'air y est froid. On peut donc supposer qu'un air froid descend sur Québec. Cet air doit, d'après le document 4, faire descendre un courant d'eau froid du pôle vers la côte nord-est des USA. Ce courant marin froid et cet air froid venant du pôle Nord expliqueraient qu'il fasse plus froid à Québec qu'à Paris.

Conclusion : bien que situé à une latitude proche de celle de Paris, Québec subit de plus grands écarts thermiques que Paris car des vents froids et un courant océanique de surface froid descendent depuis le pôle. Paris, quant à elle, bénéficie d'un courant océanique chaud, ce qui réchauffe l'air et justifie les températures moins extrêmes.

Chapitre 5

Le bilan radiatif terrestre

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La puissance solaire
3. Atmosphère, rayonnement et effet de serre

1 Introduction

Le Soleil émet un rayonnement issu des réactions nucléaires qui se produisent en son cœur. Ce rayonnement électromagnétique, dont une partie arrive sur Terre, est la source de la quasi-totalité de notre énergie. En retour, la Terre est elle-même capable d'émettre des rayonnements qui, lorsqu'ils sont piégés dans l'atmosphère, deviennent responsables de l'effet de serre. C'est le bilan des différentes puissances des rayonnements solaires et terrestres qui détermine la température moyenne à la surface de notre planète.

PROBLÉMATIQUE

Quel lien peut-on établir entre la température de surface terrestre et la puissance des rayonnements mis en jeu ?

2 La puissance solaire

2.1 La puissance solaire reçue par la Terre

Le Soleil émet une énergie rayonnante qui se répartit uniformément autour de lui. Notre planète Terre n'en reçoit qu'une infime partie. La puissance solaire reçue dépend de deux paramètres :

- la distance entre le Soleil et la Terre ;
- le rayon de la Terre.

COURS

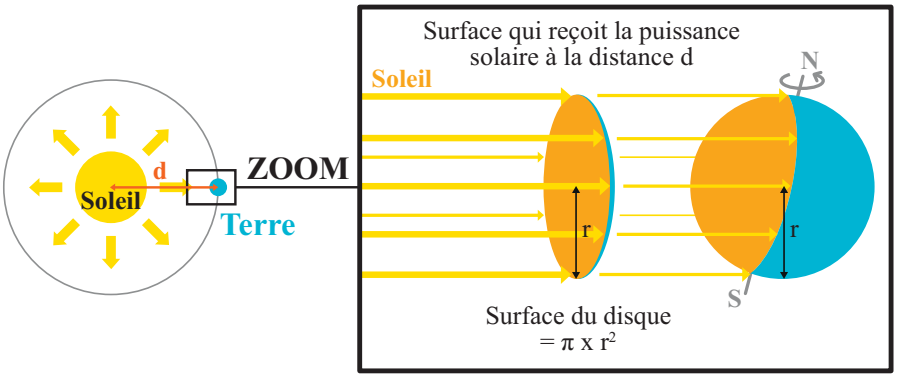


Figure 5.1 – Énergie solaire reçue par la Terre

2.1.1 - Influence de la distance entre le Soleil et la Terre

Le rayonnement en provenance du Soleil est émis uniformément à partir de sa surface : il se propage dans toutes les directions de l'espace et se répartit sur une sphère dont la surface est $S_{\text{sphère}} = 4\pi d^2$, où d est la distance Terre-Soleil (voir partie gauche de la figure 5.1). La puissance surfacique (c'est-à-dire la puissance par unité de surface) est donnée par la formule suivante :

$$P_{\text{surfacique}} = \frac{P_{\text{Soleil}}}{S_{\text{sphère}}} \text{avec } P_{\text{Soleil}} = 3{,}87 \times 10^{26} \text{ W.}$$

La distance Terre-Soleil étant de $1{,}51.10^{11}$ m, la puissance surfacique reçue au niveau de la Terre est :

$$P = \frac{3{,}87.10^{26}}{4 \times \pi \times (1{,}51.10^{11})^2} \simeq 1\,370 \text{ W.m}^{-2}.$$

D'une manière générale, plus la distance au Soleil augmente, plus la puissance surfacique reçue diminue.

Voir exercice 7 page 130.

2.1.2 - Influence du rayon de la Terre

Plus le rayon d'une planète est grand, plus la planète intercepte le rayonnement solaire. Pour calculer la puissance solaire totale interceptée par la Terre, on considère un disque imaginaire, orienté perpendiculairement au rayonnement incident. Seuls les rayons qui traversent le disque imaginaire atteignent la Terre (voir partie droite de la figure 5.1). La surface de ce disque vaut πr^2, où r est le rayon de la Terre.

Pour estimer avec une bonne approximation la puissance solaire reçue sur Terre, il suffit donc de multiplier la puissance surfacique calculée à la section précédente par la surface de ce disque imaginaire :

$P_{\text{reçue}} = P_{\text{surfacique}} \times \pi r^2$

$P_{\text{reçue}} \simeq 1\,368 \times 3{,}14 \times (6{,}4.10^5)^2 = 1{,}76.10^{15}$ W.

Ce raisonnement est valable pour toutes les planètes, mais il conviendra d'utiliser la distance entre le Soleil et la planète pour calculer la puissance surfacique, puis le rayon de la planète pour calculer la puissance reçue.

Remarque : On a fait l'approximation que la portion de sphère interceptée par la Terre a la même surface que le disque imaginaire de même rayon que la Terre. On peut montrer que cette approximation est tout à fait valable dans la mesure où la distance Terre-Soleil est très grande devant le rayon de la Terre.

Puisque la Terre tourne sur elle-même, la puissance qu'elle reçoit se répartit intégralement sur toute sa surface, c'est à dire sur une sphère dont la surface vaut $4\pi r^2$. Donc, de toute la puissance solaire répartie sur une sphère d'aire A_T, la Terre n'intercepte qu'une faible portion se répartissant sur une surface terrestre d'aire A_T donc la part d'énergie solaire est :

$$\frac{A_T}{A_S} = \frac{\pi \times R_T^2}{4\pi d_{TS}^2} = \left(\frac{R_T}{2d_{TS}}\right)^2.$$

On estime ainsi que la terre ne reçoit qu'une infime partie (environ 1/2 milliardième) de la puissance émise par le soleil.

2.2 L'albédo terrestre

La Terre renvoie une partie du rayonnement solaire.

Définition 1 : albédo

L'albédo α est le rapport de la puissance de rayonnement réfléchi par la puissance du rayonnement incident reçu tel que

$$\alpha = \frac{P_{\text{réfléchi}}}{P_{\text{incident}}}.$$

L'albédo est une grandeur sans unité comprise entre 0 et 1, où 0 correspond à une absorption totale et 1 correspond à une réflexion totale. La valeur de l'albédo dépend de la nature de la surface et de la couverture nuageuse : plus il y a de nuages, plus l'albédo augmente. Plus la surface est blanche, plus son albédo augmente. L'albédo moyen sur Terre est de 0,3.

L'albédo permet d'évaluer la fraction de la puissance du rayonnement solaire transmise vers le sol. Plus il est faible, plus cette puissance radiative solaire absorbée en surface est importante ce qui provoque un échauffement plus important de

COURS

la surface terrestre.

À RETENIR

Le Soleil rayonne de manière uniforme. Seule une faible proportion du rayonnement émis par le Soleil atteint la Terre et son atmosphère. La proportion de la puissance totale qui atteint la Terre est déterminée par le rayon de la Terre et par la distance entre la Terre et le Soleil. La Terre réfléchit et diffuse une partie du rayonnement solaire incident, et absorbe le reste. L'albédo est la proportion de rayonnement réfléchi par rapport au rayonnement reçu. L'albédo moyen sur Terre est de 0,3 (30 %).

Voir exercice 2 page 126.

3 Atmosphère, rayonnement et effet de serre

Retrouvez l'absorption de l'énergie solaire par l'atmosphère en vidéo avec

3.1 L'absorption de l'énergie solaire reçue par l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est principalement constituée de diazote, de dioxygène et de traces d'autres gaz. Ces gaz absorbent le rayonnement solaire incident dans certaines gammes de longueur d'onde. Les rayons non absorbés sont diffusés. Ces gaz absorbent environ 20 % de l'énergie solaire reçue. Ainsi, en prenant en compte ces éléments et l'albédo terrestre, on estime que la moitié seulement de la puissance solaire reçue au sommet de l'atmosphère est absorbée par la surface terrestre.

Voir exercice 6 page 129.

3.2 L'émission d'un rayonnement infrarouge et l'effet de serre

L'absorption de l'énergie solaire par la Terre augmente sa température, ce qui se traduit par l'émission d'un rayonnement infrarouge. Plus la température est élevée, plus l'intensité de ce rayonnement est importante.

Les gaz de l'atmosphère piègent une fraction de ce rayonnement infrarouge réémis par la Terre. Ce mécanisme est responsable d'une élévation de la température de l'atmosphère : c'est *l'effet de serre*. Sans effet de serre, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18 °C au lieu des +15 °C actuels. Il n'y aurait pas d'eau à l'état liquide, donc pas de vie.

Voir schéma page suivante.

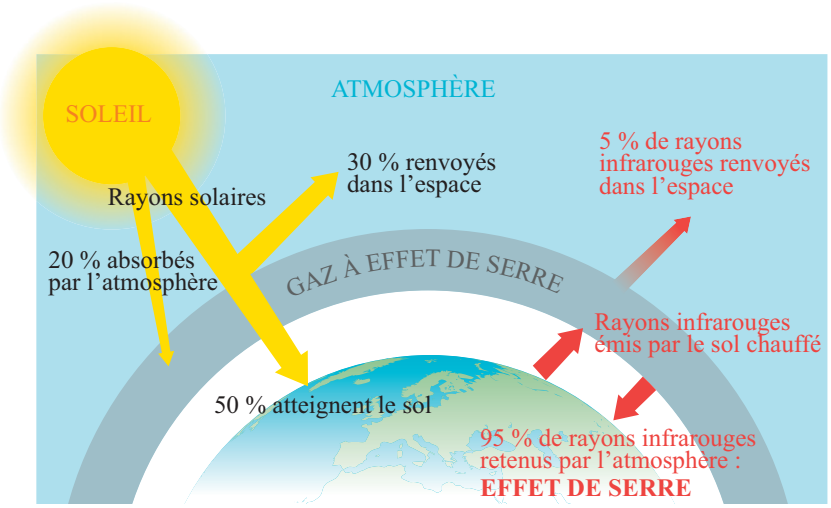


Figure 5.2 – Rayonnement infrarouge et effet de serre

En libérant en masse des gaz à effet de serre, les activités humaines accroissent l'absorption de rayonnement infrarouge et augmentent l'effet de serre et la température moyenne de la Terre.

Tout comprendre sur le réchauffement climatique avec live!

Voir exercice 3 page 127.

3.3 L'équilibre radiatif dynamique de la Terre

Définition 2 : bilan radiatif terrestre

Le bilan radiatif terrestre est la différence entre la quantité d'énergie parvenant au sol terrestre (depuis l'atmosphère et le Soleil) et l'énergie qui en repart.

Cette différence, sur une courte période de temps, est nulle : le sol terrestre émet en moyenne autant d'énergie qu'il en reçoit de l'atmosphère et du Soleil.

Définition 3 : équilibre dynamique

Un système est en équilibre lorsque sa température moyenne ne varie pas dans le temps. Cet équilibre est *dynamique* lorsque l'énergie entrante est égale à l'énergie sortante.

Le bilan radiatif de la Terre est donc en équilibre dynamique.

En moyenne, la surface de la Terre reçoit et émet 391 $W.m^{-2}$.

La figure suivante donne un bilan radiatif simplifié de la Terre.

COURS

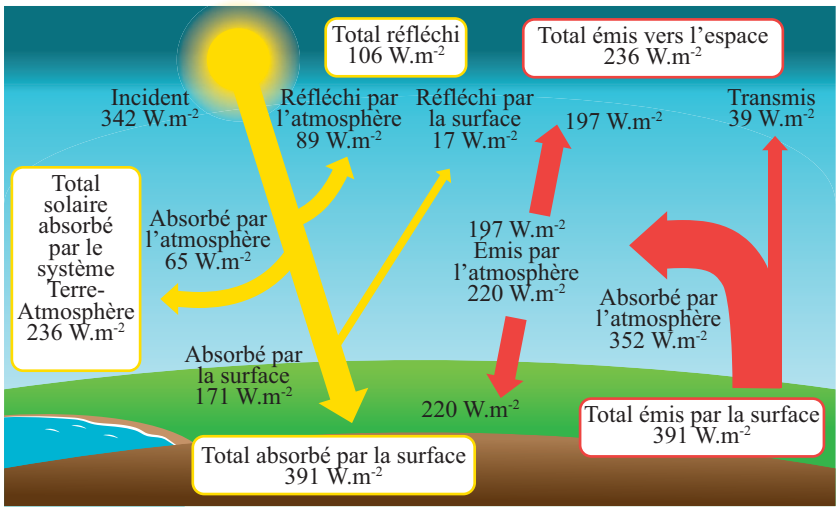


Figure 5.3 – Bilan radiatif simplifié de la Terre

Voir exercice 4 page 127.

À RETENIR

- La surface terrestre renvoie en moyenne autant d'énergie qu'elle en reçoit : le bilan radiatif terrestre est un équilibre dynamique.
- L'effet de serre est dû au piégeage par certains gaz de l'atmosphère terrestre du rayonnement infrarouge émis par le sol. Il augmente la température moyenne de la Terre.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 132

Choisissez la bonne réponse pour chaque série de propositions.

1 Le rayonnement solaire est surtout constitué de :

[a] rayonnements du domaine du visible et des infrarouges ;

[b] rayonnements X et gamma ;

[c] rayonnements de type ultraviolets et visibles.

2 La puissance du rayonnement solaire reçue par la Terre dépend :

[a] du diamètre de la Terre et de sa distance au Soleil ;

[b] surtout de l'effet de serre ;

[c] seulement du type d'étoile nous éclairant.

3 La Terre intercepte la puissance rayonnée par le Soleil qui traverse la surface :

[a] de l'intégralité de la surface terrestre soit une sphère entière ;

[b] d'un disque correspondant à la surface projetée de la Terre ;

[c] d'une demi-sphère qui correspond à la moitié de la surface de la Terre exposée au Soleil.

4 L'albédo de notre planète :

[a] n'est dû qu'à la surface terrestre ;

[b] est une constante et vaut 0,7 ;

[c] diminue la puissance solaire absorbée par la surface terrestre.

5 Le rayonnement reçu au sol :

[a] est équivalent au rayonnement IR émis par la surface ;

[b] est absorbé aussi par la couche d'ozone, ce qui produit un effet de serre ;

[c] est un rayonnement UV.

6 L'albédo atteint une valeur minimale sur une surface :

[a] couverte de glace ;

[b] couverte de neige ;

[c] couverte d'eau liquide.

7 Pour une puissance solaire P interceptée par la Terre et un albédo moyen α de la Terre, la puissance radiative reçue par l'atmosphère, les océans et les continents vaut :

[a] $\alpha \times (1 - P)$; [b] $(1 - \alpha) \times P$; [c] $\dfrac{1 + P}{\alpha}$.

[d] $\dfrac{P}{\alpha}$; [e] $\dfrac{1 - P}{\alpha}$;

INTERROS

8 La Terre à 15 °C émet des rayonnements :

a de longueur d'onde de l'ordre du μm ;

b de type UV, visibles et IR ;

c dans le domaine du visible pour l'œil humain.

9 La troposphère et la stratosphère de notre planète :

a absorbent surtout des rayonnements infrarouges émis par la surface et les gaz à effet de serre ;

b absorbent en surface une partie du rayonnement UV émis par la Terre ;

c laissent diffuser l'ensemble du rayonnement visible produit par la Terre.

10 La Terre reçoit une puissance radiative moyenne en provenance du Soleil :

a moins grande que celle qu'elle émet ;

b aussi grande que celle qu'elle émet ;

c moins forte que celle qu'elle produit en interne par radioactivité.

11 L'effet de serre :

a est un phénomène uniquement dû aux activités humaines ;

b est un phénomène naturel ;

c est limité par la production de CO_2 par les végétaux réalisant la photosynthèse ;

d est limité par la production de méthane par les rizières.

12 Le bilan radiatif de la Terre correspond à la différence entre :

a rayonnement solaire incident et rayonnement infrarouge émis par la Terre et l'atmosphère ;

b rayonnement IR transmis et rayonnement IR émis par la partie haute de l'atmosphère ;

c rayonnement solaire reçu et rayonnement terrestre réémis ;

d rayonnement IR incident et rayonnement IR émis par la surface.

2 Les effets de la fonte de la banquise ★

5 min Corrigé p. 132

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

À partir de vos connaissances, expliquez en quoi la fonte de la banquise et des glaciers aux pôles depuis plus de 30 ans peut avoir des répercussions lointaines comme la fonte des glaciers dans les Alpes ou l'Himalaya.

Document : albédo de différentes surfaces

Surface	Océan	Sable	Glace	Neige fraîche
Albédo	0,05 à 0,1	0,25 à 0,4	0,6	0,9

3 Étude de deux gaz à effet de serre ★ 15 min Corrigé p. 132

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. À partir du document ci-dessous, expliquer en quoi l'eau et le dioxyde de carbone, gaz à effet de serre, ne protègent pas les êtres vivants des rayonnements ultraviolets.

2. Expliquer avec le document ci-dessous en quoi on peut dire que ces deux gaz ont des propriétés physiques différentes, mais aussi communes dans le cadre de l'effet de serre.

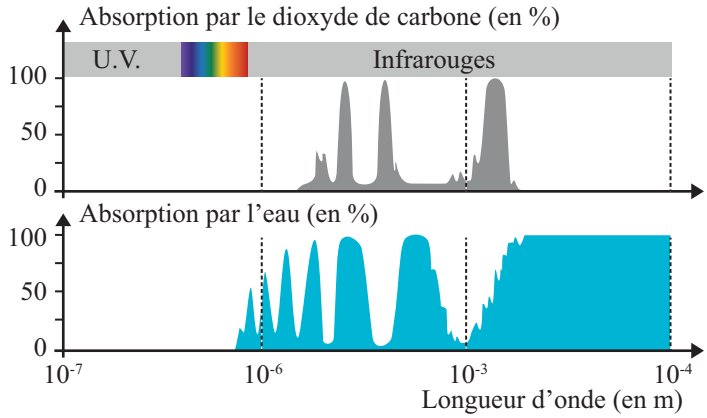


Figure 5.4 – Absorption et rayonnements

4 Énergie reçue par la Terre et la Lune ★★ 25 min Corrigé p. 133

Lycée Saint-Martin, Rennes

La puissance totale du rayonnement émis par le soleil dans toutes les directions est égale à $P_{\text{soleil}} = 3{,}87.10^{26}$ W.

Sur Terre, la température moyenne est de 15 °C alors que sa température théorique devrait être de -18 °C si c'était un corps noir.

Sur la Lune qui n'a pas d'atmosphère, la température fluctue entre -170 °C et 130 °C alors que, sur Terre, elle varie entre -80 °C et 60 °C.

Informations complémentaires :

- Distance Terre-Soleil : $d_{TS} = 149{,}6$ millions de km.
- Distance Lune-Soleil : $d_{LS} = 149{,}6$ millions de km (nous ferons l'approximation que la distance Lune-Soleil est identique à la distance Terre-Soleil).
- Rayon terrestre : $R_T = 6\,371$ km.
- Rayon lunaire : $R_L = 1\,737$ km.

INTERROS

1 Calculer la puissance surfacique du rayonnement solaire lorsque celui-ci atteint la Terre et lorsqu'il atteint la Lune.

2 Calculer la puissance reçue par la Terre et la Lune, puis comparer les résultats.

3 Calculer la puissance du rayonnement solaire renvoyé vers l'espace, sachant que l'albédo terrestre est de 30 % en moyenne pour la Terre et de 11 % pour la Lune.

4 En déduire la valeur de la puissance du rayonnement absorbée par la Terre et la Lune.

5 Expliquer en quoi cette part absorbée n'est pas strictement équivalente qualitativement.

6 **(a)** À partir de vos connaissances, réaliser un schéma présentant le bilan radiatif de la Terre.

Le détail des valeurs n'est pas attendu. Il faut cependant faire apparaître les valeurs du rayonnement total arrivant en haut de l'atmosphère et celle du rayonnement total repartant vers l'espace.

(b) Faire de même pour la Lune, sachant que c'est un satellite naturel de la Terre situé comme la Terre à environ 150.10^6 km du Soleil et que la Lune n'a pas d'atmosphère. La Lune se comporte comme un corps noir. Justifier le schéma grâce à un court texte.

7 Expliquer à partir de vos connaissances pourquoi les fluctuations de température sont plus grandes sur la Lune et pourquoi la température moyenne est plus faible au sol que sur Terre.

5 Puissance reçue par les planètes du système solaire ★★

20 min

Corrigé p. 135

Lycée Lakanal, Sceaux

Le tableau ci-dessous regroupe un certain nombre d'informations sur les huit planètes du système solaire.

Planète	Distance au Soleil (en 10^6 km)	Rayon de la planète (en km)	Puissance surfacique solaire reçue (en $W.m^{-2}$)
Mercure	58	2 439	9 467
Vénus	108	6 052	3 140
La Terre	150	6 371	1 368
Mars	227	3 390	613
Jupiter	778	69 911	53
Saturne	1 457	58 232	12
Uranus	2 870	25 362	4
Neptune	4 500	24 622	1,6

1 Tracer la courbe représentant la puissance surfacique reçue en fonction de la distance du Soleil.

2 Parmi les propositions suivantes, choisir la ou les réponse(s) exacte(s) :

a La puissance surfacique reçue par une planète ne dépend pas de sa distance au Soleil.

b La puissance surfacique reçue par une planète est proportionnelle à sa distance au Soleil.

c Plus la distance entre le Soleil et la planète est grande, plus la puissance surfacique reçue est grande.

d Plus la distance entre le Soleil et la planète est grande, plus la puissance surfacique reçue est petite.

3 En prenant en compte les rayons des différentes planètes, calculer la puissance reçue par chaque planète et compléter le tableau ci-dessous.

Planète	Puissance reçue (en W)
Mercure	
Vénus	
La Terre	
Mars	
Jupiter	
Saturne	
Uranus	
Neptune	

4 La température de surface de Mercure est de 167 °C alors que la température de surface de Vénus est 464 °C. À partir de vos connaissances, proposer une explication au fait que la température à la surface de Mercure soit plus faible qu'à la surface de Vénus.

6 Quand Laki s'en mêle

★★ 20 min Corrigé p. 137

Lycée Claude Bernard, Paris

Les volcans entrant en éruption peuvent projeter de grandes quantités de SO_2 dans l'atmosphère se transformant en gouttelettes d'acide sulfurique qui peuvent résister 2 à 3 ans dans la stratosphère (haute atmosphère). Ces aérosols (particules en suspension dans l'air) dans l'atmosphère, ainsi que les poussières de roches projetées en altitude (en cas de volcanisme explosif) peuvent augmenter l'albédo global et entraîner un refroidissement de l'atmosphère donc une baisse de la température de surface.

Ce fut le cas de l'éruption du volcan Laki en Islande du 8 juin 1783 à février 1784. Il libéra de très grandes quantités de lave. Il est à l'origine du plus grand

épanchement de laves des temps historiques dans le monde. On estime que l'éruption du Laki a libéré 20 millions de tonnes de CO_2.

Les molécules toxiques de l'atmosphère ont entraîné une forte mortalité dans la biosphère à l'origine de famines. S'en suivirent un pic d'épidémies.

Outre les gaz toxiques entraînant une surmortalité, ce volcanisme a entraîné des perturbations climatiques occasionnant à leur tour de nombreux morts.

L'hiver 1783-1784 fut marqué par de fortes chutes de neige en France et un fort gel (-14 °C dans l'Ain). La fonte des épaisses couches de neige entraîna de fortes inondations. Ce fut l'hiver le plus rude depuis plus d'un siècle.

1 Avec le matériel suivant, proposer une expérience analogique qui montrerait l'impact ou non des aérosols sur le rayonnement solaire incident reçu au niveau du sol.

Matériel : lampe, luxmètre, cristallisoir, couvercle, papier d'Arménie (sa combustion produit une fumée grisâtre).

2 À partir des résultats donnés dans le tableau ci-dessous et du texte introductif, expliquer en quoi de fortes éruptions volcaniques comme celles du Laki ont pu entraîner un refroidissement global.

Cristallisoir	Sans fumée	Avec fumée
Intensité lumineuse réçue par le luxmètre	1 253	842

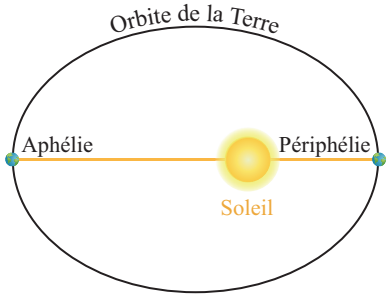
Tableau 5.1 – Résultats expérimentaux (valeurs exprimées en $W.m^{-2}$)

7 Trajectoire elliptique de la Terre

★★★ 25 min Corrigé p. 138

Lycée du Parc, Lyon

La trajectoire de la Terre autour du Soleil n'est pas un cercle. C'est une ellipse. Le Soleil n'est pas situé au centre de l'ellipse (voir schéma).



La position telle que la Terre est au plus près du Soleil est appelée « périhélie » et la position telle que la Terre est la plus éloignée du Soleil est appelée « aphélie ».

Au périhélie, la distance Terre-Soleil vaut $d_{DP} = 1{,}475.10^8$ km.
À l'aphélie, la distance Terre-Soleil vaut $d_{DA} = 1{,}525.10^8$ km.

La Terre passe à l'aphélie aux alentours du 4 juillet et au périhélie aux alentours du 3 janvier.

1. Calculer la puissance reçue par la Terre lorsqu'elle se situe au périhélie.
2. Calculer la puissance reçue par la Terre lorsqu'elle se situe à l'aphélie.
3. À partir de la moyenne des deux valeurs précédentes, estimer la proportion de l'énergie solaire reçue sur Terre.
4. Le fait que la trajectoire soit une ellipse permet-il d'expliquer pourquoi dans l'hémisphère nord il fait (en moyenne) plus chaud l'été que l'hiver ? Justifier votre réponse.

Données :

- La formule permettant de calculer le surface d'une sphère de rayon r est : $S = 4 \times \pi \times r^2$.
- La puissance émise par le Soleil est de $3{,}87.10^{26}$ W.
- La Terre sera assimilée à une sphère de rayon $R_T = 6\,400$ km.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 125

1. Réponse [a].
2. Réponse [a].
3. Réponse [b].
4. Réponse [c].
5. Réponse [a] : environ 390 W.m^{-2} hors flux de chaleur des changements d'états de l'eau...
6. Réponse [c] : maximale pour la neige, un peu moins pour la glace qui est moins blanche.
7. Réponse [b] : si l'albédo de la Terre est de 0,3 soit 30 % alors il reste 70 % de la puissance surfacique (100 % - 30 % soit 1 - 0,3 soit $1-\alpha$) pour l'absorption par l'atmosphère et la transmission vers la surface. Si on divisait par P, les unités ne seraient pas cohérentes. La réponse est en W.m^{-2}.
8. Réponse [a] : des infrarouges et l'ordre de grandeur est en μm.
9. Réponse [a] : l'atmosphère peut absorber d'autres rayonnements en provenance du Soleil mais la surface n'émet que des infrarouges.
10. Réponse [b] : elle reçoit et émet 342 W.m^{-2}.
11. Réponse [b] : les végétaux absorbent plus de CO_2 par photosynthèse qu'ils n'en produisent pas respiration. Le CO_2 et le CH_4 sont des gaz à effet de serre donc ils favorisent l'effet de serre. Les activités humaines l'amplifient.
12. Réponse [c].

2 Les effets de la fonte de la banquise

Enoncé p. 126

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

Si la banquise et les glaciers fondent au niveau des pôles, la surface blanche diminue, donc il y a moins de surface réfléchissante à fort albédo. Ces surfaces sont remplacées par des surfaces océaniques dont l'albédo a une valeur comprise entre 0,05 et 0,1. Ces surfaces absorbant le rayonnement solaire, la température terrestre globale augmente. Cette augmentation générale fait fondre également les glaciers alpins et himalayens.

3 Étude de deux gaz à effet de serre

Enoncé p. 127

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1. L'eau absorbe des rayonnements dans le domaine du rouge et de l'infrarouge et le CO_2 uniquement dans les infrarouges. Aucun des deux

n'absorbe d'UV d'après ce graphique. Or, si un rayonnement n'est pas absorbé, il risque d'arriver en surface et les UV étant cancérigènes, l'eau et le CO_2 ne protègent pas les êtres vivants des UV.

2 La vapeur d'eau, tout comme le CO_2, absorbe les infrarouges. Ces deux gaz participent donc à l'absorption d'infrarouges issus de la surface de la Terre, et participent donc tous les deux à l'effet de serre.

On peut noter, en outre, que les spectres d'absorption de ces deux gaz dans le domaine des infrarouges sont presque complémentaires de telle sorte que l'atmosphère absorbe l'essentiel du rayonnement infrarouge reémis par la surface de la Terre vers l'espace.

4 Énergie reçue par la Terre et la Lune

Enoncé p. 127

Lycée Saint-Martin, Rennes

1 Le rayonnement solaire est émis dans toutes les directions selon une surface sphérique. La Terre et la Lune étant à la même distance du Soleil, le rayonnement solaire se répartit sur une surface d'aire

$$A_S = 4\pi \times (149.10^9)^2,$$

donc la puissance surfacique est donnée par :

$$P_s = \frac{P_{\text{soleil}}}{A_S}$$

avec $A_S = 4\pi d_{TS}^2$. D'où :

$$P_s = \frac{3{,}87.10^{26}}{4\pi \times (149.10^9)^2} = 1{,}39 \times 10^3 \text{ W.m}^{-2}.$$

2 La Terre reçoit le rayonnement solaire sur un disque de rayon R_T tandis que la Lune reçoit ce même rayonnement sur un disque de rayon R_L. Sachant que l'aire d'un disque est πR^2 alors :

- la Terre reçoit une puissance $P_T = P_s \times \pi \times R_T^2$, d'où
$$P_T = 1{,}39.10^3 \times \pi \times (6{,}37.10^6)^2 = 1{,}77.10^{17} \text{ W}.$$
- la Lune reçoit une puissance
$$P_L = 1{,}39.10^3 \times \pi \times (1{,}74.10^6)^2 = 1{,}32.10^{16} \text{ W}.$$

3 Du fait de l'albédo α, la Terre perd 30 % de la puissance P_T et la Lune perd 11 % de la puissance P_L.

- Pour la Terre : $P_{\text{diff},T} = \alpha_T . P_T = 0{,}3 \times 1{,}77.10^{17} = 5{,}31.10^{16}$ W.
- Pour la Lune, $P_{\text{diff},L} = \alpha_L . P_L = 0{,}11 \times 1{,}32.10^{16} = 1{,}45.10^{15}$ W.

4 La puissance reçue par la Terre se répartit en puissance absorbée P_{abs} et puissance renvoyée vers l'espace P_{diff}. On a donc :

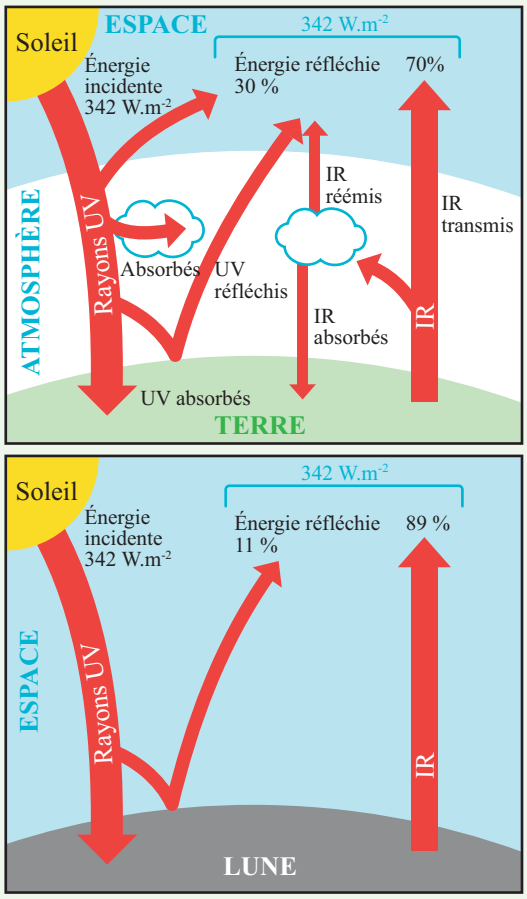
$$P_{\text{abs},T} = P_T - P_{\text{diff},T} = (1-\alpha_T) \times P_T = 0{,}7 \times 1{,}77.10^{17} = 1{,}24.10^{17} \text{ W}.$$

De même, pour la Lune, on a :

$$P_{\text{abs},L} = (1 - \alpha_L) \times P_L = 0{,}89 \times 1{,}32.10^{16} = 1{,}17.10^{17}\text{W}.$$

5 Sur la Lune, il n'y a pas d'atmosphère, contrairement à la Terre, donc pas d'absorption par l'atmosphère. Donc les rayons non réfléchis sont, sur Terre, soit absorbés par l'atmosphère soit absorbés par la surface alors que sur la Lune ils sont absorbés uniquement par la surface.

6 Le schéma ci-dessous montre le bilan radiatif simplifié de la Terre (en haut) et de la Lune (en bas).



La Terre et la Lune étant à la même distance, la puissance solaire reçue est la même, soit 342 W.m^{-2}. La Terre et la Lune étant en équilibre radiatif, la somme des rayons perdus équivaut au rayonnement solaire incident. Sur la Lune, les rayons perdus correspondent au rayonnement émis par la surface à -18 °C et les rayons réfléchis par diffusion par la surface.

7 Cas des maxima : Sur la Lune, il n'y a pas d'atmosphère donc pas d'absorption par l'atmosphère ; les rayons incidents arrivent sur la surface et sont soit réfléchis soit absorbés. La Lune échauffée à -18 °C se comporte comme un corps noir. Elle émet des IR vers l'espace (sans qu'aucun rayon ne soit réémis vers la surface). Donc, sa température théorique coïncide avec sa température réelle moyenne mesurée.

Mais sur Terre, la présence de gaz d'une atmosphère induit un albédo que n'a pas la Lune dépourvue d'atmosphère. Or, l'albédo réduit la part de rayonnements arrivant en surface donc susceptible d'échauffer la surface. Ainsi, la surface terrestre chauffe moins en journée.

Cas des minima : quand la Lune est éclairée par le Soleil, la totalité des rayonnements solaires arrivent au sol de la Lune donc la surface s'échauffe et la surface émet des IR qui vont dans l'espace. La nuit, le sol lunaire ne reçoit pas de rayonnements IR depuis l'atmosphère contrairement à la Terre. Donc la nuit, la surface terrestre peut être échauffée par les IR et donc les minima sont moindres sur Terre.

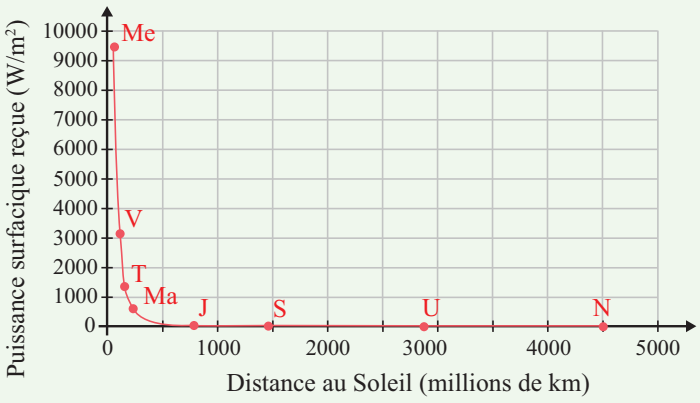
Conclusion : sur terre, c'est la présence d'une atmosphère qui explique les différences entre températures théoriques et réelles ainsi que les variations de températures plus faibles que sur la Lune : l'albédo de l'atmosphère limite les fortes températures en journée et tandis que l'atmosphère, composée de gaz à effet de serre, envoie des IR vers la surface, ce qui la réchauffe. Cela limite les températures très négatives.

5 Puissance reçue par les planètes du système solaire

Enoncé p. 128

Lycée Lakanal, Sceaux

1 En choisissant une échelle judicieuse, le graphique demandé est le suivant :



Légende :
Me : Mercure - V : Vénus - T : Terre - Ma : Mars
J : Jupiter - S : Saturne - U : Uranus - N : Neptune

2 La seule proposition correcte est la dernière : « *Plus la distance entre le Soleil et la planète est grande, plus la puissance surfacique reçue est petite.* ».

3 Pour obtenir la puissance reçue P, il faut multiplier la puissance surfacique reçue au niveau de chaque planète P, par la surface S du disque imaginaire de même rayon r que la planète considérée :

$$P = P_s \times S \quad \text{avec } S = \pi \times r^2.$$

ATTENTION

Dans l'application numérique, il faut bien penser exprimer r en mètres !

D'où les résultats regroupés dans le tableau ci-dessous.

Planète	Puissance reçue (en W)
Mercure	$1{,}7.10^{17}$
Vénus	$3{,}61.10^{17}$
La Terre	$1{,}74.10^{17}$
Mars	$2{,}21.10^{16}$
Jupiter	$8{,}13.10^{17}$
Saturne	$1{,}28.10^{17}$
Uranus	$8{,}08.10^{15}$
Neptune	$3{,}05.10^{15}$

4 La puissance surfacique reçue par Vénus est plus faible que celle reçue par Mercure car elle est plus éloignée du Soleil. On s'attendrait donc à ce que la température sur Vénus soit moins élevée que sur Mercure.

La différence s'explique par le fait que, contrairement à Vénus, Mercure n'a pas d'atmosphère.

L'atmosphère de Vénus lui permet de conserver une partie de l'énergie reçue (par effet de serre) ce qui contribue à augmenter la température à sa surface.

6 Quand Laki s'en mêle

Enoncé p. 129

Lycée Claude Bernard, Paris

Schéma de l'expérience

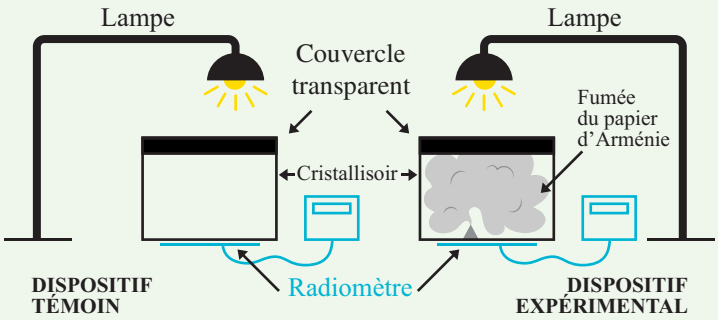


Figure 5.5 – Schéma de l'expérience et du dispositif témoin

MÉTHODE

- On part de ce que l'on voit.
- Ne pas confondre les observations et les déductions
- Citer des valeurs
- Faire le lien entre le modèle et la réalité
- Vérifier que l'on a bien répondu à la question en la relisant.

On voit qu'avec la fumée dans le cristallisoir, l'intensité lumineuse reçue, après avoir traversé la fumée, n'est que de 842 $W.m^{-2}$, alors que sans fumée elle était de 1 253 $W.m^{-2}$. Donc, on peut déduire que le rayonnement de la lampe a été soit absorbé, soit a pu être plus réfléchi par la fumée, du fait de sa couleur (gris clair).

Or, la fumée représente l'effet qu'auraient les aérosols volcaniques dans l'atmosphère. Donc, les aérosols volcaniques pourraient limiter la transmission des rayons solaires, entraînant une surface moins chauffée. Ainsi, elle émettrait moins d'infrarouges qui seraient moins renvoyés par les gaz à effet de serre vers la surface.

Avec un déficit de rayonnement reçu par la surface, on peut comprendre que la surface terrestre ait pu subir un refroidissement suite à cette éruption volcanique.

CORRIGÉS

7 Trajectoire elliptique de la Terre

Enoncé p. 130

Lycée du Parc, Lyon

1 Pour déterminer la puissance reçue par la Terre au périhélie, il faut tout d'abord déterminer la puissance surfacique reçue à la distance d_{SP} du Soleil :

$$P_s = \frac{P_{Soleil}}{4\pi d_{SP}^2} = \frac{3{,}87.10^{26}}{4\pi \times (1{,}475.10^{11})^2} = 1\,415 \text{ W.m}^{-2}.$$

ATTENTION

Dans l'application numérique, il faut penser à convertir les km en m !

Il faut ensuite multiplier cette puissance surfacique par la surface du disque imaginaire de même rayon que la Terre pour obtenir la puissance reçue au périhélie (notée P_P) :

$$\begin{aligned} P_P &= P_s \times S \\ &= 1\,415 \times \pi \times 6\,400\,000^2 = 1{,}82.10^{17} \text{ W}. \end{aligned}$$

ATTENTION

De la même manière, il ne faut pas oublier de convertir la valeur du rayon de la Terre en mètre.

2 Un raisonnement analogue, où l'on remplace d_{SP} par d_{SA} permet d'obtenir :

$$\begin{aligned} P_S &= \frac{P}{4\pi d_{SA}^2} = \frac{3{,}87.10^{26}}{4\pi \times (1{,}525.10^{11})^2} = 1\,324 \text{ W.m}^{-2} \\ &= 1\,324 \times \pi \times 6\,400\,000^2 = 1{,}70.10^{17} \text{ W}. \end{aligned}$$

3 La moyenne des deux valeurs précédentes permet d'évaluer la puissance reçue sur Terre :

$$P = \frac{P_P + P_A}{2} = \frac{1{,}82.10^{17} + 1{,}70.10^{17}}{2} = 1{,}76.10^{17} \text{ W}.$$

La proportion de l'énergie solaire reçue sur Terre est égale au rapport de l'énergie reçue par la Terre sur l'énergie émise par le Soleil, c'est-à-dire :

$$\frac{P}{P_{Soleil}} = \frac{1{,}76.10^{17}}{3{,}87.10^{26}} = 4{,}5.10^{-10}.$$

La Terre reçoit environ un demi milliardième de l'énergie produite par le Soleil.

4 On pourrait penser que le fait que la Terre soit plus ou moins proche Soleil permet d'expliquer pourquoi il fait plus chaud en été qu'en hiver

dans l'hémisphère nord. Or ce n'est pas le cas. En effet, la Terre est à l'aphélie au début du mois de juillet. C'est donc lorsque la Terre est la plus éloignée du Soleil que c'est l'été dans l'hémisphère nord.

Le fait qu'il fasse plus chaud l'été dans l'hémisphère nord est dû à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. À cause de cette inclinaison, l'angle d'incidence des rayons est plus grand en hiver qu'en été (voir figure ci-dessous).

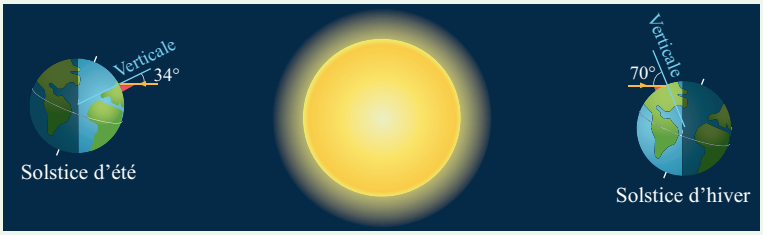
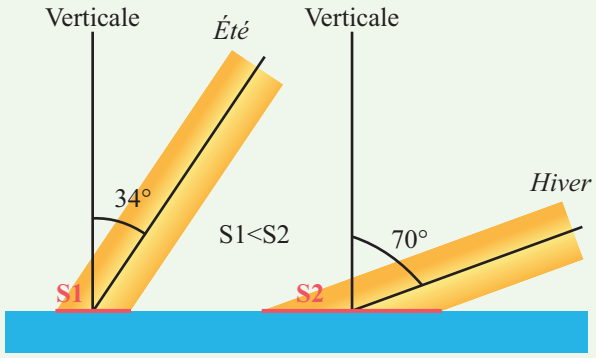


Figure 5.6 – Angles d'incidence des rayons solaires aux solstices.
Les angles sont donnés pour une latitude de 45°, c'est-à-dire à peu près la latitude de Paris.

Dans L'hémisphère nord, la quantité d'énergie reçue est donc répartie sur une plus grande surface en hiver qu'en été, (voir figure ci-dessous) d'où les différences de températures entre ces deux saisons.



Chapitre 6

Conversion biologique de l'énergie solaire par photosynthèse

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La feuille, lieu de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique
3. Importance de la photosynthèse à l'échelle planétaire
4. Une biomasse disponible dans les roches carbonées

1 Introduction

La *photosynthèse* est un métabolisme autotrophe réalisé par les plantes chlorophylliennes grâce à l'énergie solaire. Ce métabolisme permet de produire de la matière organique à partir de matière minérale. A l'échelle des temps géologiques, les combustibles fossiles sont les témoins de la photosynthèse passée.

PROBLÉMATIQUE

Comment l'énergie solaire est-elle utilisée pour produire de la matière organique grâce à la photosynthèse ?

2 La feuille, lieu de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique

PROBLÉMATIQUE

Comment la feuille capte-t-elle l'énergie lumineuse et peut-elle la convertir en énergie chimique utilisable par les plantes ?

Retrouvez une vidéo sur la photosynthèse avec Nathan live

COURS

2.1 De l'énergie lumineuse à une énergie chimique

Les cellules végétales réalisant la photosynthèse contiennent des organites appelés *chloroplastes*.

Ils contiennent des pigments dont les *chlorophylles*, des composés chimiques capables d'absorber certains rayonnements du domaine du visible. Au sein des chloroplastes, se trouvent des structures appelées thylakoïdes, dont les membranes renferment les pigments chlorophylliens. Leur extraction et leur séparation nécessitent un traitement particulier qui permet l'éclatement des chloroplastes. La chromatographie permet de séparer les substances dans un mélange à partir de chlorophylle brute.

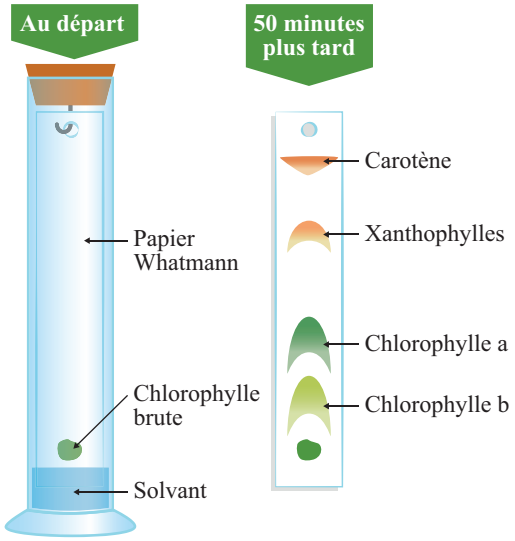
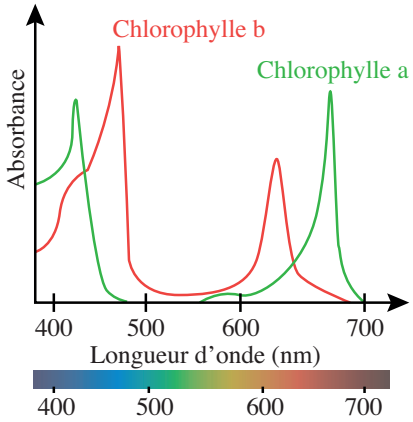


Figure 6.1 – Extraction des pigments chlorophylliens par chromatographie

La chlorophylle brute extraite de feuilles vertes est en fait un mélange de pigments : des pigments verts, les chlorophylles a et b, ainsi que des pigments jaunes et orangés, les xantophylles et les caroténoïdes.

Il est possible d'évaluer le pouvoir d'absorption de la lumière blanche par une solution de pigments et ainsi établir le spectre d'absorption des chlorophylles a et b selon les différentes longueurs d'onde.

Voir figure page suivante.



La chlorophylle brute (chlorophylles a et b chez la plupart de végétaux terrestres) absorbe les longueurs d'onde du bleu et du rouge. Les longueurs d'ondes du vert sont donc transmises ou diffusées (d'où la couleur verte des feuilles).

Grâce à l'énergie du rayonnement solaire, un végétal produit de la matière organique, sous forme de *glucides* (dont le glucose $C_6H_{12}O_6$ est un exemple), et du dioxygène à partir de matières minérales que sont le CO_2 et H_2O. Ceci est dû à une suite de réactions chimiques ayant lieu dans les chloroplastes : la *photosynthèse*.

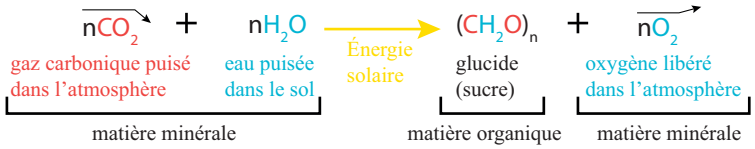


Figure 6.2 – Équation simplifiée de la photosynthèse
Les flèches noires correspondent aux échanges gazeux

Dans les chloroplastes des feuilles, grâce aux pigments chlorophylliens, une partie de l'énergie lumineuse est *convertie* en énergie chimique, c'est à dire une énergie associée aux liaisons qui unissent les atomes de la matière. De l'énergie est libérée ou consommée lors de la rupture ou la formation de ces liaisons. Ainsi, un végétal dispose de molécules organiques contenant une énergie chimique provenant de l'énergie solaire.

POUR ALLER PLUS LOIN

La photosynthèse se déroule dans les chloroplastes des cellules chlorophylliennes. Elle comporte deux étapes : une phase photochimique dépendante de la lumière qui se déroule au niveau des pigments chlorophylliens contenus dans les thylakoïdes et une phase chimique permettant la fabrication des glucides dans le stroma des chloroplastes. Ces deux phases ne se déroulent pas au même endroit, mais dépendent l'une de l'autre.

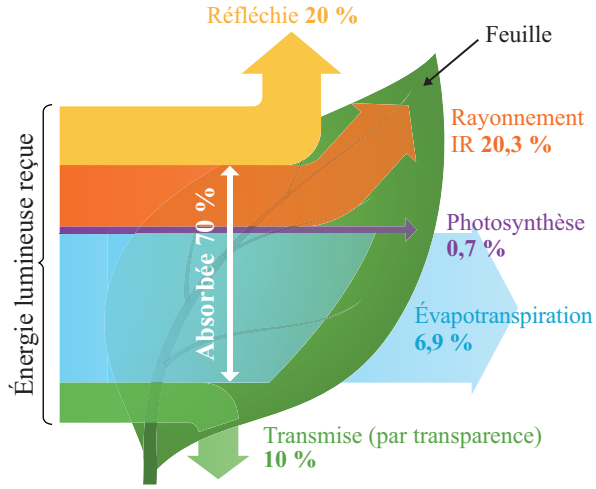
Voir exercices 7 page 152 et 8 page 153.

COURS

2.2 La photosynthèse utilise qu'une faible proportion de l'énergie solaire incidente

Parmi les rayonnements émis par le Soleil, à l'échelle de la feuille, seule une petite fraction appartenant au spectre visible est utilisée pour la photosynthèse. En effet, lorsqu'un rayonnement arrive au niveau de la feuille :

- *environ 10% du rayonnement incident est transmis* : il traverse l'objet par transparence ;
- *environ 20% du rayonnement incident est réfléchi* : il est renvoyé dans toutes les directions ;
- *environ 70% du rayonnement solaire incident est absorbé*, dont 1% seulement est converti en énergie chimique dans le chloroplaste sous forme de glucides. Le reste est libéré par l'évapotranspiration (environ 49% du rayonnement solaire) ou dissipé sous forme de chaleur (environ 20% du rayonnement solaire).



Voir exercices 2 page 149, 8 page 153 et 9 page 156.

2.3 Le devenir des glucides produits par photosynthèse

Le *métabolisme* correspond aux transformations chimiques de création et destruction de molécules dans une cellule. Parmi les nombreuses transformations du métabolisme, on peut citer la respiration cellulaire : c'est un ensemble de transformations biochimiques pendant lesquelles du glucose est dégradé en présence de dioxygène, et qui aboutit à la production de molécules énergétiques et de déchets (CO_2 et H_2O), ainsi que d'énergie thermique non utilisable (chaleur).

Les glucides formés pourront être transformés en diverses molécules (autres glucides, lipides, acides aminés, acides nucléiques…) dans la cellule grâce aux ions

provenant du sol. S'ils ne sont pas utilisés pour le fonctionnement cellulaire, ils peuvent aussi être exportés, grâce à la sève, vers d'autres cellules situées dans des organes comme par exemple les racines ou les fleurs.

À RETENIR

À partir de CO_2 et d'eau, les cellules chlorophylliennes des plantes sont capables de produire de la matière organique (glucides) et du dioxygène. Ce métabolisme se réalise grâce à l'énergie solaire captée par les pigments chlorophylliens. Seule une faible proportion de l'énergie solaire incidente est convertie en énergie chimique lors de la photosynthèse. Grâce au métabolisme cellulaire, l'énergie contenue dans les molécules organiques permet à la plante de réaliser les différentes fonctions nécessaires à la vie.

3 Importance de la photosynthèse à l'échelle planétaire

PROBLÉMATIQUE

En quoi la photosynthèse est-elle un phénomène majeur à l'échelle de la planète ?

Les végétaux sont des *producteurs primaires*, c'est à dire les premiers à produire de la matière organique dont les autres maillons dépendent. On estime que les végétaux produisent par photosynthèse une *biomasse* (quantité de matière organique créée) de 800 Gt/an. Il s'agit de la *productivité primaire brute* (*P.P.B.*) : *quantité de matière fabriquée par les producteurs primaires*.

Environ 80% de la PPB est consommée par respiration pour assurer le fonctionnement des cellules végétales. Les 20% restant correspondent à la *productivité primaire nette* (*P.P.N.*), disponible pour le reste de la biosphère. On estime que la moitié de la PPN (donc 10% de la PPB) est consommée par l'ensemble des organismes non chlorophylliens au sein des réseaux trophiques. Ces organismes font partie des *consommateurs* (producteurs secondaires de type phytophage, c'est à dire se nourrissant de plantes ; ou de type zoophage, c'est à dire se nourrissant d'animaux etc.), dont les molécules organiques constituent un stock d'énergie chimique exploitable. L'autre moitié de la PPN (10% de la PPB) correspond à la matière décomposée par respiratoire et fermentation grâce aux champignons et bactéries. Les *décomposeurs* permettent de transformer la matière organique morte en matière minérale.

COURS

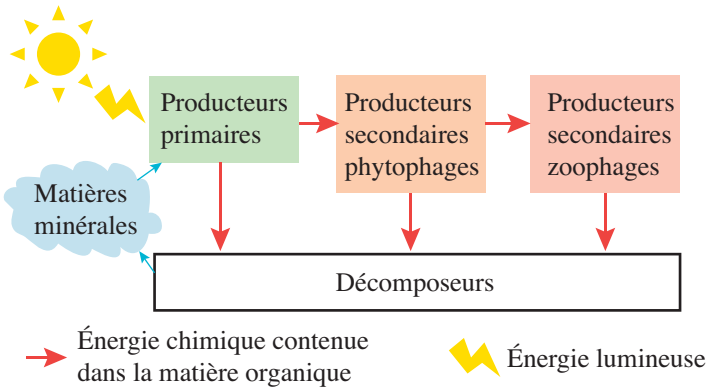


Figure 6.3 – Flux de matière et d'énergie

À RETENIR

À l'échelle de la planète, les organismes photosynthétiques permettent de produire une biomasse d'environ 800 Gt de matière, correspondant à la productivité primaire brute. La biomasse disponible (PPN) est utilisée par des consommateurs. La photosynthèse est donc un processus indispensable à l'équilibre des réseaux trophiques.

Voir exercices 3 page 149, 4 page 151, 5 page 151 et 6 page 152.

4 Une biomasse disponible dans les roches carbonées

PROBLÉMATIQUE

Comment les combustibles fossiles peuvent-ils se former à partir de biomasse ?

Les combustibles fossiles non renouvelables (gaz naturel, charbon, pétrole) couvrent actuellement à l'échelle mondiale environ 80 % de nos besoins énergétiques. Un *combustible fossile* est une ressource naturelle riche en molécules organiques constituées d'un fort pourcentage de carbone. Il présente les indices d'une origine biologique : il est composé des principaux atomes des êtres vivants (carbone, hydrogène, oxygène et azote), comme on le voit dans le tableau ci-dessous.

	C	H	O	N	S
Charbon	75 - 92	4 - 6	1 - 2		
Pétrole	83 - 87	10 - 14	0,05 - 1,5	0,1 - 2	0,05 - 6
Gaz naturel	65 - 80	1 - 25		1 - 1,5	0 - 0,2

Tableau 6.1 – Proportions des différents atomes dans les combustibles fossiles en pourcentage

À l'échelle des temps géologiques et sous réserve de remplir certaines conditions (comme une forte productivité primaire), il arrive qu'une partie de la matière organique directement ou indirectement produite lors de la photosynthèse soit ensevelie sous de fortes quantités de sédiments dans des bassins sédimentaires. Si elle est enfouie rapidement, cette matière peut se retrouver en conditions anoxiques (privées d'O_2) ; la décomposition par les décomposeurs ayant besoin d'O_2 est alors réduite. Cette matière organique sera ensuite transformée en combustibles fossiles. Ces phénomènes sont très lents, ce qui explique que les gisements actuels datent de plusieurs millions d'années. Le temps exact de leur formation dépend de différentes conditions (vitesse d'enfouissement par exemple). On estime que 1% de la biomasse des êtres vivants qui ont peuplé la Terre a servi à former les ressources fossiles.

Remarque : le pétrole est majoritairement produit entre 2 et 3 km de profondeur et le gaz entre 3 et 4 km de profondeur. Le pétrole a pour origine principale le phytoplancton océanique (microalgues photosynthétiques migrant au gré des courants), alors que le charbon a plutôt pour origine les forêts du domaine continental susceptibles d'être immergées.

La combustion de ces combustibles fossiles en présence d'O_2 permet de récupérer de l'énergie pouvant servir à se chauffer ou à créer de d'électricité. La combustion de combustibles fossiles d'origine végétale revient donc à libérer l'énergie chimique d'origine solaire qui était contenue dans les molécules organiques fossilisées. Cette combustion s'accompagne d'un rejet de CO_2 favorisant l'effet de serre.

À RETENIR

A l'échelle des temps géologiques, une partie de la matière organique (globalement des végétaux ou du phytoplancton) s'accumule dans les sédiments. Puis elle se transforme en profondeur en donnant des combustibles fossiles : charbon, pétrole, gaz naturel. La matière organique végétale a été produite par la photosynthèse, le Soleil est donc la source d'énergie à l'origine des combustibles fossiles.

Voir exercice 9 page 156.

INTERROS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 159

Choisir la bonne réponse parmi les propositions suivantes.

1 Au niveau d'une feuille chlorophyllienne :

a l'énergie absorbée est totalement diffusée ;

b l'énergie transmise traverse entièrement la feuille d'où sa couleur verte ;

c l'énergie incidente est en grande partie utilisée pour fabriquer des molécules carbonées ;

d l'énergie incidente provoque une évapotranspiration foliaire.

2 Le spectre d'absorption des chlorophylles et le spectre d'action de la photosynthèse :

a sont superposables globalement ;

b sont globalement différents, un pic d'absorption correspondant à peu de production de O_2 ;

c ont un maximum au niveau des longueurs d'onde du vert d'où la couleur verte des feuilles.

3 La photosynthèse nécessite :

a principalement les longueurs d'onde du bleu et du rouge en plus du O_2 ;

b principalement les longueurs d'onde du bleu et du rouge en plus du glucose ;

c principalement les longueurs d'onde du bleu et du rouge en plus du CO_2.

d principalement les longueurs d'onde du vert en plus du O_2.

4 L'énergie lumineuse :

a n'est pas vitale aux végétaux verts (autotrophes) ;

b est convertie en énergie incidente par les végétaux verts lors de la photosynthèse ;

c est utilisée lors de la respiration ;

d est utilisée pour produire des glucides dont le glucose qui sera utilisé dans les mitochondries pour la respiration cellulaire.

5 Les végétaux verts :

a permettent la production de matière minérale par photosynthèse ;

b sont uniquement terrestres ;

c sont à la base de nombreux écosystèmes de la biosphère ;

d sont à la base de toutes les chaînes alimentaires.

6 La matière organique produite par photosynthèse :

a sert uniquement à réaliser la croissance de la plante ;

b sert en partie à synthétiser de nouvelles molécules organiques ;

c est une source de matière et énergie inutilisable par la cellule.

7 À l'échelle de la planète, les végétaux utilisent pour réaliser la photosynthèse :

a 20 % de l'énergie solaire arrivant en surface ;

b 0,5 % de l'énergie solaire arrivant en surface ;

c 0,1 % de l'énergie solaire arrivant en surface.

8 Les combustibles fossiles :

a ne peuvent pas fournir d'énergie par combustion ;

b se forment rapidement, en quelques milliers d'années ;

c sont le résultat d'une transformation de la matière organique pendant des millions d'années.

9 Les combustibles fossiles sont une source :

a d'énergie renouvelable ;

b utilisée par l'homme à une vitesse supérieure à celle de leur formation ;

c d'énergie surtout d'origine animale.

10 Les combustibles fossiles :

a sont des sédiments pauvres en carbone ;

b proviennent de matière minérale enfouie ;

c sont issus d'une transformation lente de la matière surtout végétale ;

d n'ont aucun lien avec les produits de la photosynthèse.

2 Rayonnement absorbé par une feuille ★

10 min — Corrigé p. 159

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

Un végétal chlorophyllien absorbe environ 70 % de l'énergie lumineuse qu'il reçoit. 70 % de cette énergie absorbée causent une évapotranspiration et 29 % sont émis sous la forme de rayonnements (majoritairement infrarouges). Le reste de l'énergie absorbée permet de réaliser la photosynthèse.

1 Déterminer le pourcentage représenté par l'évaporation, le rayonnement émis et la part de la photosynthèse.

2 À partir de vos connaissances et de ces calculs, réaliser un schéma indiquant comment est répartie l'énergie solaire reçue par une feuille de végétal chlorophyllien.

3 Photosynthèse à l'échelle planétaire ★

15 min — Corrigé p. 160

Lycée La Bruyère, Versailles

On a mesuré les productions primaires brutes à l'échelle de la planète des océans et de végétaux terrestres. La productivité primaire correspond à la

INTERROS

biomasse végétale produite par unité de temps et par unité de biomasse déjà présente dans un écosystème. Elle traduit donc une vitesse de production de la matière végétale sèche par les végétaux chlorophylliens. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous.

	Organismes océaniques	Organismes terrestres
Productivité primaire brute des organismes photosynthétiques (en GigaTonnes de carbone par an)	242,5 Gt / an	282 Gt / an

Cette matière sèche végétale contient des molécules carbonées riches en énergie. On peut ainsi convertir la productivité primaire exprimée en Gt de carbone/an en productivité exprimée en joule/an/m^2. Le pouvoir calorifique du carbone est le suivant : 1 kg de carbone équivaut à 32 Méga Joules. On peut déduire des valeurs précédentes, les données suivantes qui sont exprimées en quantité d'énergie (kJ/an/m^2) :

- puissance énergétique solaire annuelle : $5{,}4.10^6$ kJ/an/m^2 ;
- productivité Primaire Brute océanique et continentale : $3{,}35.10^4$ kJ/an/m^2 ;
- perte par décomposition dans le sol : $1{,}1.10^4$ kJ/an/m^2 ;
- perte par respiration des êtres-vivants : $1{,}5.10^4$ kJ/an/m^2 ;
- productivité Primaire nette océanique et continentale : $6{,}6.10^3$ kJ/an/m^2.

1 Calculer la productivité primaire nette (en Gt de carbone/an) des organismes photosynthétiques sachant que seulement 20% de ce que produit un organisme photosynthétique est disponible pour les consommateurs primaires. Vous ferez le calcul pour les organismes océaniques puis pour les organismes terrestres.

2 Comparer les deux valeurs obtenues.

3 Calculer la proportion (en %) d'énergie solaire annuelle réellement accumulée par les organismes chlorophylliens.

4 Vous expliquerez ce faible taux à l'aide des indications données à propos des pertes et de vos connaissances sur la photosynthèse.

5 La Terre a une surface de 510.10^6 km^2. Calculer la quantité d'énergie stockée par tous les organismes chlorophylliens sur Terre et utilisable par les organismes non-chlorophylliens.

4 Énergie dans un agrosystème

★ 15 min Corrigé p. 161

Lycée Sophie Germain, Paris

Un agrosystème est un écosystème exploité par l'Homme. Dans les différents éléments de la chaîne alimentaire, on a mesuré la quantité d'énergie présente, ramenée à 1 m^2 sur une année.

Les résultats sont dans le tableau ci-dessous.

Éléments de la chaîne alimentaire		
Numéro de l'élément	Nom de l'élément	Quantité d'énergie ($kJ/m^2/an$)
1	Énergie reçue par les producteurs primaires	87 000
2	Producteurs primaires (luzerne)	14 000
3	Consommateurs primaires (vache)	1 600
4	Consommateurs secondaires (Homme)	90

Tableau 6.2 – Tableau présentant les quantités d'énergie estimées dans chaque élément d'une chaîne alimentaire d'un agrosystème.

1. Sous quelle forme se trouve l'énergie dans chaque élément de la chaîne alimentaire ?
2. Exposer brièvement comment se fait le changement de forme d'énergie lors du passage de l'élément 1 à l'élément 2.
3. Expliquer pourquoi la quantité d'énergie n'est pas la même dans chaque élément de la chaîne alimentaire.
4. Calculer le rendement énergétique du passage de l'énergie solaire reçue à l'Homme.

5 Purificateur d'air

★ 15 min Corrigé p. 161

Lycée Lavoisier, Paris

La mairie d'une grande ville teste un système de purification de l'air ambiant sous forme d'un édifice en forme de colonne en verre d'un volume d'un m^3, qui contient dans de l'eau une culture de microalgues spécialement sélectionnées. Ces microalgues doivent utiliser l'air pollué de la ville qui entre dans la colonne (un air riche en CO_2 et NO_2) et, grâce à la lumière ambiante, le purifier par photosynthèse et rejeter un air contenant du dioxygène O_2.

Le bioréacteur devrait permettre de fixer 1 tonne de CO_2 par an. Dans cette colonne, les microalgues peuvent croître et créer de la biomasse. Celle-ci est évacuée vers une station d'épuration puis transformée en biométhane pour chauffer les villes.

1. Sachant qu'un arbre fixe en moyenne 10 kg de CO_2 par an, calculer le nombre d'arbres auquel cet équipement peut se substituer.
2. Préciser la forme d'énergie utilisée par les microalgues pour leur croissance et celle obtenue après le recyclage.
3. Indiquer en quoi le biométhane est une source d'énergie renouvelable.

6 Photosynthèse VS panneaux solaires ★★

10 min Corrigé p. 162

Lycée Saint-Martin, Rennes

Les panneaux solaires photovoltaïques ont pour but de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Le rendement des ces panneaux varie en fonction de plusieurs facteurs dont la durée d'ensoleillement du lieu d'installation. Les panneaux solaires sont une alternative à l'utilisation des énergies fossiles ou nucléaires, pour produire de l'électricité. Le problème majeur de l'électricité est la difficulté que pose son stockage. Les panneaux solaires posent aussi le problème de leur production qui utilise des matériaux non renouvelables et polluants. L'un des composants des panneaux photovoltaïque est le silicium. Il faut beaucoup d'énergie pour l'extraire. On estime qu'il faut environ 2 ans d'utilisation des panneaux voltaïques pour compenser l'énergie dépensée pour leur construction.

On cherche à calculer le rendement de ces panneaux photovoltaïques.

La production annuelle moyenne de 10 m² de panneaux solaires est d'environ 2 400 kWh à Marseille et de 1 500 kWh à Lille. Pour un ensoleillement de 8 h par jour, un panneau solaire peut recevoir jusqu'à 1 000 W/m^2.

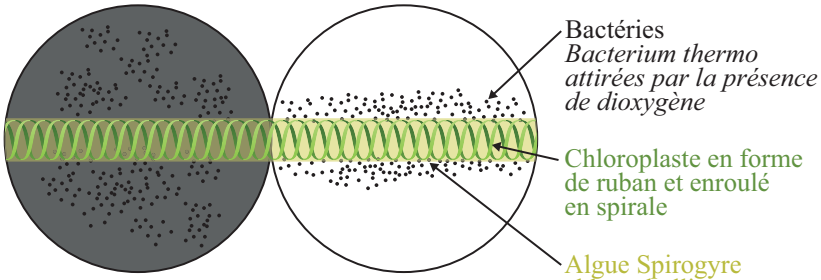
1. Calculer le rendement de ces panneaux solaires. Puis le comparer à celui de la photosynthèse.
2. Comparer les caractéristiques des transformations d'énergie par un panneau photovoltaïque et par une cellule de végétal chlorophyllien.

7 L'expérience historique d'Engelman ★★

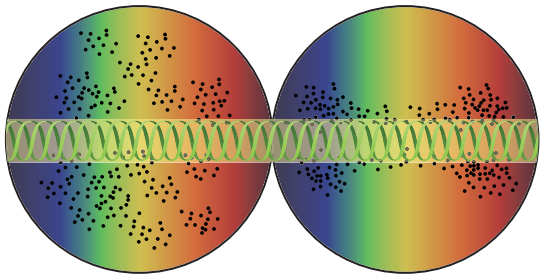
10 min Corrigé p. 163

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

Engelman a réalisé une expérience en 1885 en utilisant une méthode biologique pour la détermination du spectre d'action de la photosynthèse. Il a utilisé une algue filamenteuse, la Spirogyre, pourvue sur toute sa longueur d'un ou plusieurs chloroplastes rubanés et spiralés. Il a placé l'algue dans un milieu contenant une suspension de bactéries, *Bacterium thermo*. Ces bactéries sont dotées d'un chimiotropisme positif pour l'oxygène : elles se déplacent vers les zones riches en dioxygène. Lorsqu'il éclairait la Spirogyre, les bactéries se rassemblaient tout le long de l'algue. En effet, éclairée, l'algue produit du dioxygène grâce à la photosynthèse, et ce dioxygène attire les bactéries.



Ensuite Engelman a éclairé la préparation au travers d'un prisme qui décompose la lumière. Les bactéries se sont rassemblées contre l'algue mais essentiellement dans les régions soumises à des radiations bleues ou rouges. Il en a déduit que ce sont ces radiations qui sont les plus efficaces pour la production de dioxygène donc pour la photosynthèse.



Interprétez les résultats de cette expérience.

8 La photosynthèse chez les algues

★★★ 45 min Corrigé p. 163

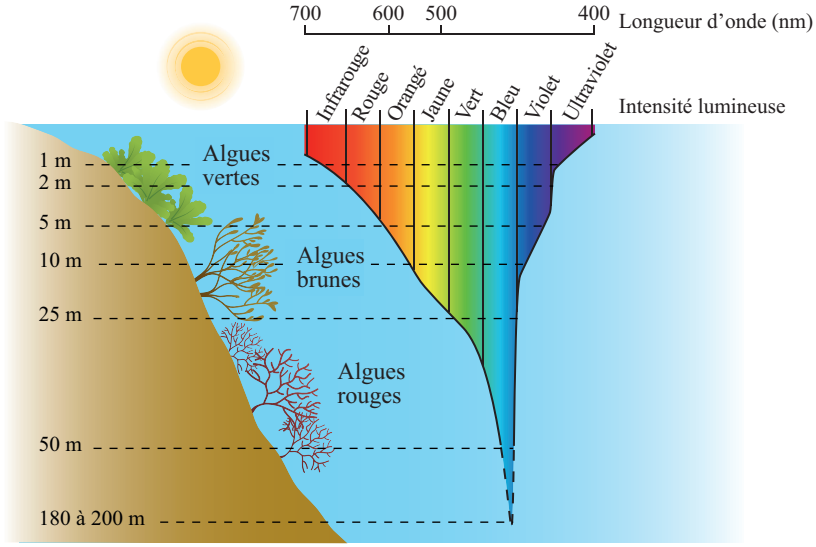
Lycée Montaigne, Bordeaux

Il existe 3 types d'algues différentes : les algues vertes, rouges et brunes. Elles ne vivent pas toutes à la même profondeur. On cherche à expliquer leur répartition en considérant que leur milieu de vie apporte la quantité de lumière nécessaire à leur maintien dans cet environnement.

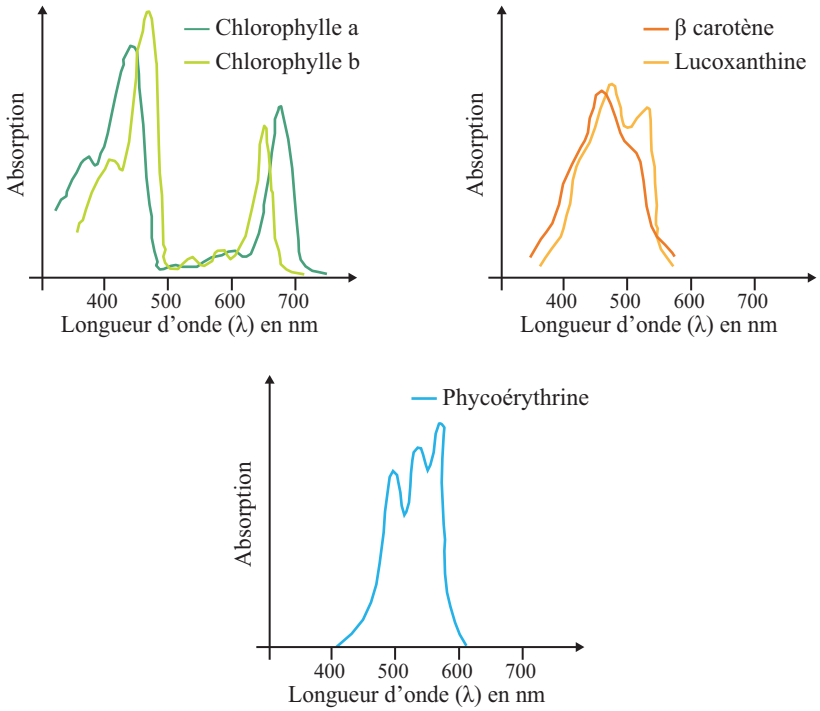
Voir documents page suivante.

INTERROS

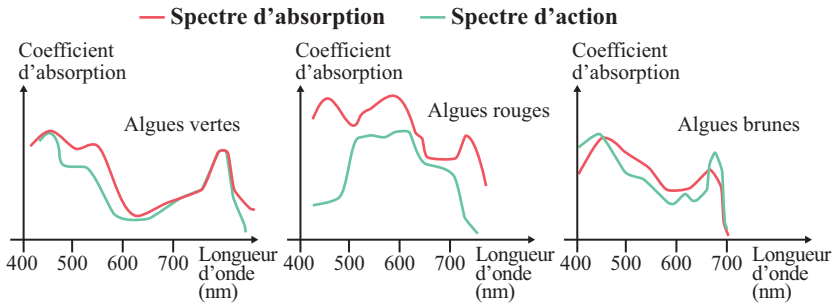
Document 1 : Répartition des algues et des longueurs d'onde de la lumière en fonction de la profondeur.



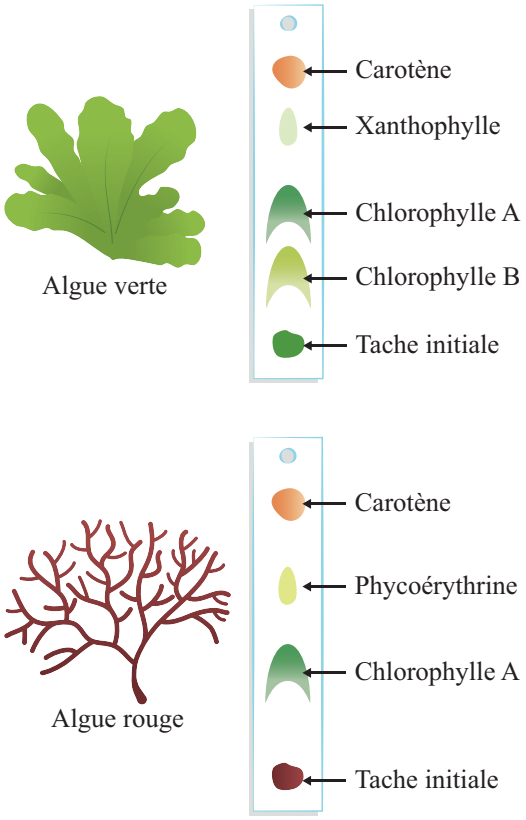
Document 2 : Spectres d'absorption de différents pigments photosynthétiques.

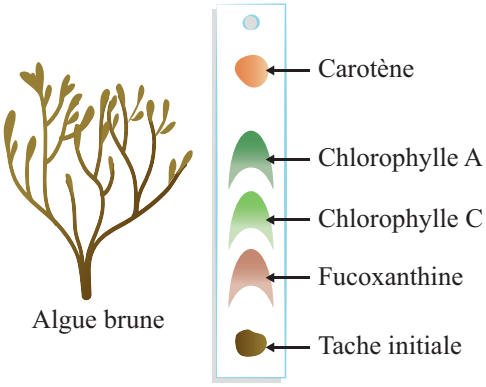


Document 3 : Spectres d'absorption des pigments et spectre d'action chez différentes algues.



Document 4 : Les pigments présents chez les différentes algues (isolés par chromatographie).





À partir de l'ensemble des informations recueillies dans les documents et de vos connaissances sur la photosynthèse, expliquer la répartition des algues le long des pentes des littoraux.

9 Une fabrication de biopétrole

★★★ 45 min Corrigé p. 165

D'après annales de baccalauréat, BAC S SVT, Nouvelle-Calédonie 2017

Face à l'épuisement progressif des réserves planétaires de pétrole fossile, différents protocoles de fabrication de biopétrole ont vu le jour depuis quelques années. Ces pétroles industriels auraient les mêmes propriétés énergétiques que le pétrole fossile, et constitueraient une alternative durable.

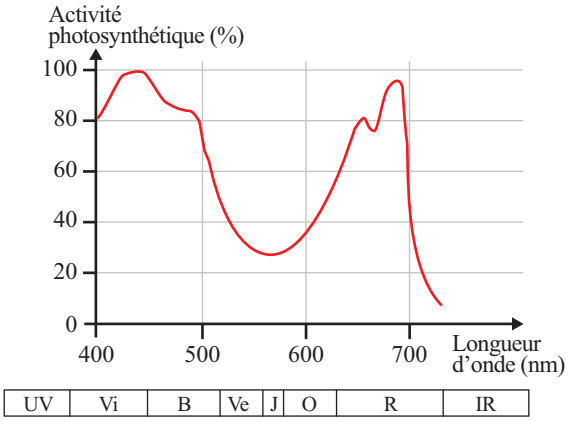
L'un de ces protocoles permettrait la fabrication d'un biopétrole à partir de millions de microalgues photosynthétiques collectées en mer et placées dans de grands tubes.

La première étape de ce protocole a pour but de stimuler la multiplication de ces microalgues pour en obtenir un nombre beaucoup plus important.

D'après www.maxisciences.com

Voir documents page suivante.

Document 1 : Activité photosynthétique en fonction de la longueur d'onde de la lumière chez une algue photosynthétique.



UV = Ultra-Violet | Vi = Violet | B = Bleu | Ve = Vert | J = Jaune
O = Orange | R = Rouge | IR = Infra-Rouge

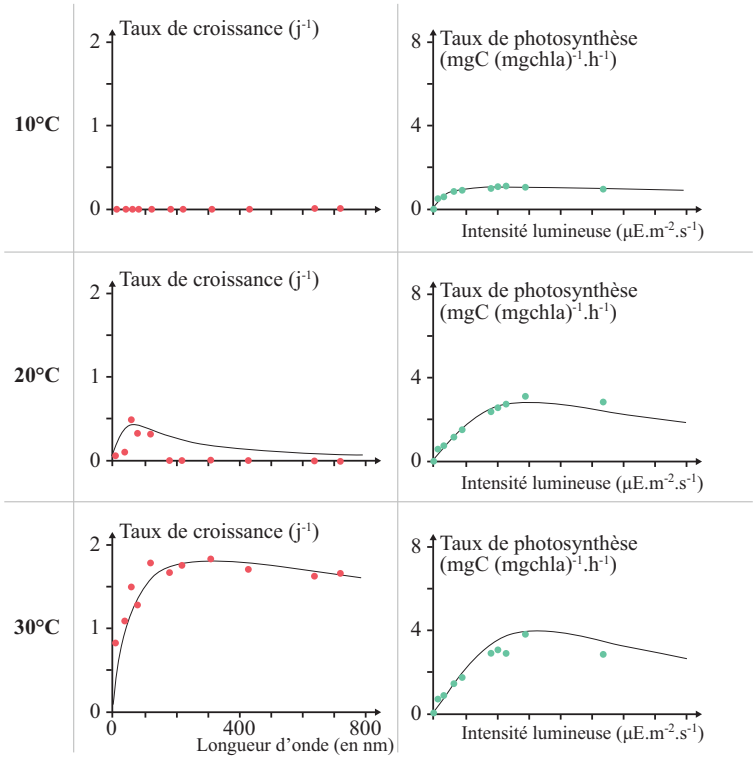
Document 2 : Taux de croissance et de photosynthèse de microalgues photosynthétiques (*Scenedesmus crassus*) en fonction de l'intensité lumineuse et de la température.

Le taux de croissance de la population de microalgues (par jour) est proportionnel à leur multiplication dans le milieu de culture.

Le taux de photosynthèse a été mesuré en masse (mg) de carbone assimilé par mg de chlorophylle a et par heure (mg $C.mg.chla^{-1}.h^{-1}$).

Voir graphiques page suivante.

INTERROS



À partir de l'étude des documents et de l'utilisation de vos connaissances, préciser les conditions de culture à privilégier par les industriels pour obtenir une production optimale de biopétrole.

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 148

1. Réponse **d**.
2. Réponse **a**.
3. Réponse **c**.
4. Réponse **d**.
5. Réponse **c**.
6. Réponse **b**.
7. Réponse **c**.
8. Réponse **c**.
9. Réponse **b**.
10. Réponse **c**.

2 Rayonnement absorbé par une feuille

Enoncé p. 149

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

1. L'évapotranspiration représente 70 % des 70 % du rayonnement solaire incident donc :

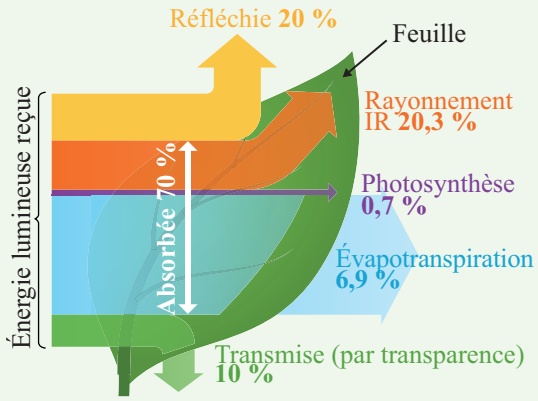
$$\frac{70 \times 70}{100} = 49\ \%.$$

Le rayonnement IR (et fluorescence) représente 29 % de 70 % donc :

$$\frac{29 \times 70}{100} = 20\ \%.$$

Ces 70 % absorbés se répartissent en trois parties qui sont l'évapotranspiration, l'émission de rayonnement (IR), et la photosynthèse. La part de la photosynthèse est donc : $70 - 20 - 49 = 1$ %.

2. Le schéma demandé est le suivant :



3 Photosynthèse à l'échelle planétaire

Enoncé p. 149

Lycée La Bruyère, Versailles

1 La productivité primaire nette des organismes photosynthétiques est la quantité de matière qui est disponible pour les consommateurs primaires. Cette productivité nette représente 20 % de la productivité brute : Donc :

$$\text{PPN} = \frac{20 \times \text{PPB}}{100}$$

$$\text{PPN océans} = \frac{20 \times 242{,}5}{100} = 0{,}2 \times 242{,}5 = 56{,}4 \text{ Gt / an.}$$

$$\text{PPN terrestre} = \frac{20 \times 282}{100} = 0{,}2 \times 282 = 48{,}5 \text{ Gt / an.}$$

2 On peut constater que les deux valeurs sont proches : la PPN terrestre est équivalente à celle des océans.

3 Pour calculer la proportion (en %) d'énergie solaire annuelle réellement accumulée par les organismes chlorophylliens, on doit estimer la proportion que représente la productivité primaire nette océanique et continentale par rapport à l'énergie solaire fournie. Donc cette proportion P se calcule de la façon suivante :

$$P = \frac{\text{PPN} \times 100}{\text{énergie solaire reçue}}$$

$$= \frac{6{,}6.10^3 \times 100}{5{,}4.10^6} = 0{,}12\%.$$

4 Sur toute l'énergie solaire reçue par les producteurs primaires, seulement 1% est utilisée pour la photosynthèse. Toute l'énergie utilisée n'est pas convertie en énergie chimique car il y a des pertes d'énergie lors de la conversion d'énergie solaire en énergie chimique. Ensuite, toute l'énergie convertie n'est pas investie dans la biomasse. Elle est aussi utilisée pour la reproduction de l'organisme, la respiration. Enfin, la biomasse est utilisée par les décomposeurs. Au final seulement 0,1 % de l'énergie solaire reçue par les producteurs primaires est disponible pour les consommateurs primaires.

5 La Terre a une surface de 510.10^6 km^2. La quantité d'énergie stockée par les organismes chlorophylliens est de $6{,}6.10^3$ kJ/an/m^2. On fait donc :

$$Q_{\text{Terre}} = Q \text{ par m}^2 \times \text{surface de la Terre}$$

$$= 6{,}6.10^3 \text{ kJ/an/m}^2 \times 510.10^{12} \text{ m}^2 = 3{,}4.10^{18} \text{ kJ/an.}$$

Cette quantité est très importante.

4 Énergie dans un agrosystème

Enoncé p. 151

Lycée Sophie Germain, Paris

1 L'énergie reçue par les producteurs primaires est de l'énergie solaire. L'énergie présente dans les producteurs primaires, consommateurs primaires et consommateurs secondaires est de l'énergie chimique contenue dans des molécules comme les glucides.

2 L'énergie solaire est convertie en énergie chimique par les végétaux chlorophylliens au cours de la photosynthèse. Cet ensemble de réactions chimiques a lieu dans le chloroplaste. Elles permettent la fabrication de glucides $(CH_2O)_n$ à partir de CO_2 et d'eau, molécules minérales. Le dioxygène O_2 produit est libéré par la plante. L'énergie chimique est contenue dans les liaisons qui unissent les atomes des composés fabriqués à partir des glucides. La rupture des liaisons produit de l'énergie.

3 Quand un consommateur consomme les individus du maillon précédent, il ne prélève pas toute la quantité d'énergie présente dans ce maillon. En outre, le consommateur n'assimile pas tout ce qu'il mange : ce qui n'est pas assimilé constitue les excréments.

Enfin, toute l'énergie qui est assimilée n'est pas utilisée pour faire de la biomasse : une partie est utilisée pour les activités (reproduction, mouvements) et le reste est perdue sous forme de chaleur.

Il y a donc de nombreuses pertes d'énergie lors du passage d'un maillon de la chaîne au suivant. Ces pertes expliquent la diminution de la quantité d'énergie présente dans les éléments de la chaîne alimentaire.

4 La quantité d'énergie dans le maillon « Homme » est de 90 KJ/m²/an, et celle de l'énergie reçue est de 87 000 KJ/m²/an. On a donc

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie dans le maillon Homme}}{\text{énergie solaire reçue}} = \frac{90}{87\,000} = 1.10^{-3}$$

c'est-à-dire environ 0,1%, ce qui est faible.

5 Purificateur d'air

Enoncé p. 151

Lycée Lavoisier, Paris

1 La colonne est censée fixer une tonne de CO_2 par an, soit 1 000 kg par an, tandis qu'un arbre en fixe 10 kg par an.

La colonne correspond donc à $1\,000/10 = 100$ arbres.

2 Les microalgues utilisent l'énergie lumineuse qui passe à travers les parois en verre pour produire du O_2 et absorber du CO_2 via la photosynthèse. La forme d'énergie utilisée est donc lumineuse, en provenance du Soleil.

Après recyclage, la biomasse obtenue sera transformée en biométhane donc en molécules contenant une énergie chimique. Puis ce biométhane sera utilisé pour le chauffage à l'origine d'une énergie thermique après combustion.

3 Par combustion, le biométhane fournit une énergie thermique. Il est produit par transformation de biomasse c'est-à-dire excès d'algues produites dans la colonne. Cette matière est produite par utilisation de CO_2, H_2O et une énergie solaire qui est une énergie renouvelable grâce à la photosynthèse. A l'échelle d'une vie humaine, cette biomasse peut, par photosynthèse, se reformer rapidement ce qui en fait une énergie renouvelable.

6 Photosynthèse VS panneaux solaires

Enoncé p. 152

Lycée Saint-Martin, Rennes

1 Le panneau de 10 m^2 reçoit $1\,000 \times 10 = 10$ kW.

On sait que $E = P \times t$ donc $E_{\text{reçue}} = 10\text{kW} \times 8\text{h} = 80\text{kWh}$ par jour donc $80 \times 365{,}25 = 29\,220$ kWh en un an.

Pour Marseille :

$$\text{Rdt} = \frac{E_{\text{récupérée}}}{E_{\text{reçue}}} = \frac{2\,400}{29\,220} \times 100 = 8{,}2\ \%.$$

Pour Lille :

$$\text{Rdt} = \frac{E_{\text{récupérée}}}{E_{\text{reçue}}} = \frac{1\,500}{29\,220} \times 100 = 5{,}1\ \%.$$

Ce faible rendement est cependant plus important que celui de la photosynthèse : en effet, sur une quantité d'énergie de 100 % reçue par une feuille, environ 1 % seulement donne de la matière organique (énergie récupérée).

2 Une cellule chlorophyllienne convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique, énergie stockée dans les molécules de la matière organique, au cours de la photosynthèse. Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique, énergie que l'on ne sait pas facilement stocker. Donc ces deux types de cellules utilisent l'énergie lumineuse et la convertissent en une autre énergie ; mais la forme d'énergie produite n'est pas la même et, celle produite par les cellules photovoltaïques a le désavantage de ne pas pouvoir être facilement stockée.

Une cellule chlorophyllienne a besoin d'eau et de sels minéraux, qu'elle trouve dans le sol ainsi que de dioxyde de carbone de l'air. Ces éléments sont en quantité suffisante, renouvelables, non polluants et ne nécessitent pas une grande dépense énergétique pour être prélevés dans le milieu. À l'inverse, pour fabriquer une cellule photovoltaïque, il faut des éléments

du type silicium. Le prélèvement de ce matériau est coûteux en énergie puisqu'il faut deux ans de production électrique pour amortir le coût du panneau. Au niveau écologique, l'extraction et le recyclage de cet élément sont polluants. Donc la production d'énergie par les panneaux photovoltaïques a des conséquences néfastes sur l'environnement à l'inverse de celle de la photosynthèse.

Enfin le rendement des cellules photovoltaïques est plus important que celui de la photosynthèse.

7 L'expérience historique d'Engelman

Enoncé p. 152

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

Au départ, lors de la première observation, Engelman constate que les bactéries sont dispersées à l'obscurité alors qu'à la lumière les bactéries se rassemblent à proximité de l'algue. Ces bactéries sont attirées par le dioxygène. Cela signifie qu'à la lumière les algues ont produit du dioxygène qui a attiré les bactéries. Ceci montre qu'à la lumière, les algues produisent du dioxygène par photosynthèse.

Ensuite Engelman décompose la lumière blanche avec un prisme : chaque portion de l'algue est éclairée par une seule couleur. Engelman a noté alors que les bactéries se situent autour des zones de l'algue éclairées par le bleu et le rouge. Cela signifie que le dégagement de dioxygène est plus fort sans l'effet des lumières bleues et rouges. Donc la photosynthèse est plus importante sans l'effet des longueurs d'onde correspondant à la lumière bleue et rouge.

Engelman venait de mettre en évidence le spectre d'action des pigments chlorophylliens contenus dans l'algue Spirogyre.

8 La photosynthèse chez les algues

Enoncé p. 153

Lycée Montaigne, Bordeaux

On cherche à expliquer la répartition des algues vertes, brunes et rouges.

Le document 1 montre que les algues vertes vivent en surface entre 1 et 5 m de profondeur, les algues brunes dans la zone des 10 à 25 m, et les algues rouges dans la zone des 25-50 m . La profondeur de leur aire de répartition n'est donc pas la même : du moins profond au plus profond on trouve d'abord les algues vertes, puis les brunes, puis les rouges.

Dans ce même document, on voit que les toutes les longueurs d'onde de la lumière ne sont pas absorbées de la même façon par l'eau :

- les algues rouges n'ont que les radiations bleues et vertes à disposition,

- les algues brunes n'ont pas de violet et pas de rouge, mais du jaune, du vert et du bleu
- et les algues vertes ont tout le spectre visible à disposition en surface, sans rouge et sans UV à 5 mètres de profondeur.

Pour vivre ces algues ont besoin de faire la photosynthèse. Le document 3 indique les spectres d'action photosynthétiques, c'est-à-dire l'efficacité des différentes longueurs d'onde de la lumière sur la photosynthèse. La photosynthèse est la plus intense :

- entre 500 nm et 600 nm pour les algues rouges ;
- vers 450 nm et 700 nm pour les algues brunes ;
- dans les bleus (450 nm) et rouges (750 nm) pour les algues vertes.

Le document 4 indique les pigments que possède chaque type d'algue. Elles ont toutes de la chlorophylle. Mais les algues rouges sont les seules à posséder de la phycoérythrine, les algues brunes sont les seules à posséder de la fucoxanthine et les algues vertes sont les seules à posséder des xanthophylles. Or, on sait que ce sont les pigments qui absorbent la lumière utilisée lors de la photosynthèse. D'après le document 2, ces pigments ne sont pas excités par les mêmes longueurs d'onde :

- les chlorophylles absorbent majoritairement les longueurs d'onde 450 nm et 750 nm ;
- la phycoérythrine des algues rouges absorbent les longueurs d'onde entre 400 et 600 nm avec un maximum entre 480 et 580 nm ;
- enfin la fucoxanthine des algues brunes absorbent les longueurs d'onde entre 400 et 580 nm.

La spécificité des spectres d'action photosynthétique de chaque type d'algues correspond aux pigments présents. En outre, les spectres d'action correspondent aux lumières qui traverse l'eau et parviennent aux algues.

Donc les algues vertes, qui ne possèdent que de la chlorophylle, ne peuvent pas vivre en dessous de 5 mètres car les longueurs d'onde bleues et rouges indispensables à leur photosynthèse n'arrivent plus au-delà de cette profondeur.

Les algues brunes possèdent de la fucoxanthine qui leur permet de faire la photosynthèse avec les longueurs d'ondes orangers jaunes. Au-delà de 25 mètres ces longueurs d'onde sont absentes : les algues brunes ne peuvent pas faire la photosynthèse, elles ne peuvent pas vivre en dessous de 25 mètres de profondeur.

Enfin, les algues rouges possèdent de la phycoérythrine qui leur permet de faire la photosynthèse dans le vert/bleu, seules longueurs d'onde présentes au-delà de 25 mètres de profondeur.

9 Une fabrication de biopétrole

Enoncé p. 156

D'après annales de baccalauréat, BAC S SVT, Nouvelle-Calédonie 2017

- Il est dit en introduction que la première étape consiste à multiplier les microalgues. Dans le document 2, on compare trois températures de culture des microalgues : 10, 20 et 30 °C. On constate que le taux de croissance est plus important à 30 °C. En même temps, on fait varier la longueur d'onde d'éclairage des algues. On constate que la multiplication des microalgues est plus efficace entre 200 et 400 nm c'est-à-dire dans les bleus.

  Ainsi, la 1ère étape qui consiste à stimuler la multiplication des microalgues est favorisée à 30 °C et avec un éclairage bleu.

- Ensuite, il faut fabriquer du biopétrole à partir des ces algues. Il convient alors de stimuler la photosynthèse des algues pour qu'elles produisent de la biomasse. Pour cela, il leur faut de la lumière et du CO_2. Le document 1 montre que l'activité photosynthétique est plus importante dans les lumières bleues et rouges. En d'autres termes, la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique contenue dans la biomasse est plus importante dans ces lumières bleues et rouges. Le document 2 complète les conditions optimales de la photosynthèse : on mesure le taux de photosynthèse en mg de carbone assimilé par mg de chlorophylle a et par heure (mg $C.mg.chla^{-1}.h^{-1}$). On voit que ce taux est plus important à 30 °C qu'à 20 ou 10 °C.

  Pour favoriser la photosynthèse, il faut donc éclairer les microalgues avec une lumière bleue et chauffer les tubes contenant les algues à 30 °C. Ainsi la photosynthèse sera plus importante et donc la production de biomasse aussi.

  Pour fabriquer du biopétrole à partir de microalgues, les industriels doivent donc éclairer les tubes avec des lumières bleues et chauffer les tubes contenant les microalgues à 30 °C. Ces deux conditions vont favoriser la multiplication des microalgues et aussi la photosynthèse. La biomasse produite sera alors importante, permettant la fabrication de biopétrole en quantité suffisante pour rentabiliser l'exploitation.

Chapitre 7

Le bilan thermique du corps humain

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Un bilan thermique stable au cours de la journée
3. Les besoins énergétiques de l'organisme
4. La régulation du bilan thermique

1 Introduction

La température de notre environnement est en général inférieure à celle de notre corps (37 °C). Un *flux thermique* se produit alors principalement de notre corps vers l'environnement extérieur. Le risque serait que notre température corporelle baisse ; or, en général ce n'est pas le cas, ce qui signifie que les quantités de chaleur perdues par le corps humain sont compensées par la production d'une quantité équivalente de chaleur dans le corps. Il y a donc un équilibre thermique qui s'établit sur l'ensemble d'une journée : on dit que l'Homme est un *homéotherme*.

PROBLÉMATIQUE

Comment la température corporelle est-elle régulée ?

2 Un bilan thermique stable au cours de la journée

PROBLÉMATIQUE

Comment se réalisent les flux de chaleur entre le corps et son environnement ?

2.1 Les pertes thermiques

Le corps humain échange de l'énergie thermique en permanence avec l'extérieur. Ces pertes thermiques peuvent se faire par l'intermédiaire de plusieurs processus :

COURS

- la *conduction* : transfert d'énergie thermique entre deux corps en contact, de la zone la plus chaude vers la zone la plus froide sans déplacement de matière. C'est par exemple le cas lorsque l'on pose sa main sur une vitre froide : l'énergie thermique passe alors de notre main (plus chaude) vers la vitre (plus froide), d'où cette sensation de froid, car notre corps a perdu de l'énergie thermique ;
- la *convection* : transfert d'énergie thermique avec déplacement de matière, de la zone chaude vers la zone froide ;
- l'*évaporation* : changement d'état de l'eau liquide en vapeur grâce à l'énergie thermique absorbée par l'eau ;
- le *rayonnement* : transfert d'énergie par émission de rayonnement infrarouge entre un objet chaud et un objet plus froid, sans contact direct.

POUR ALLER PLUS LOIN

D'après la loi de Wien (cf. chapitre 4 page 95) :

$$\lambda_{max} \times T = 2{,}9.10^{-3} \text{ m.K}$$

(T en degré Kelvin = T en degré Celsius $+273$).
Cette loi permet de connaître la longueur d'onde maximale des rayonnements émis connaissant la température en K d'un corps noir. Dans le cas du corps humain, la température moyenne est de 37°C soit 310 K :

$$\lambda_{max} = \frac{2{,}9.10^{-3}}{37 + 273} = 9{,}3 \ \mu\text{m (infrarouge).}$$

Ainsi le rayonnement émis par le corps humain suite à son échauffement est un rayonnement infrarouge, comme notre planète.

La *puissance thermique* (en W) traduit la quantité d'énergie thermique évacuée par le corps par unité de temps ($P = E/t$). On estime que la puissance libérée au repos par une personne éveillée est d'environ *100 W*. Le schéma qui suit représente les différentes pertes thermiques avec une estimation de la puissance libérée pour un homme de 1,70 m pesant 70 kg.

Voir schéma page suivante.

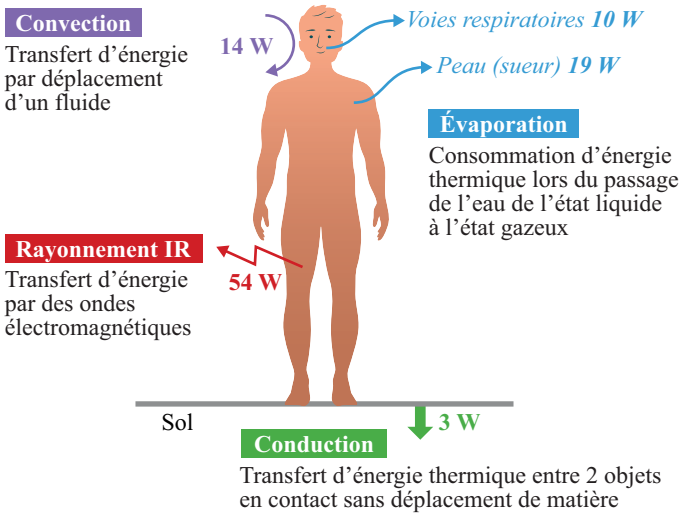


Figure 7.1 – Schéma des échanges thermiques entre le corps humain et son milieu.

Les objets environnants chauds ou le rayonnement solaire sur la peau peuvent contribuer de façon mineure à réchauffer l'organisme. Lorsqu'il fait froid, c'est surtout par conduction et lorsqu'il fait très chaud c'est surtout par convection que se réalisent les pertes thermiques.

Voir exercice 4 page 177.

2.2 Production de chaleur

Afin de garantir un équilibre thermique, divers processus liés au fonctionnement de notre corps permettent de produire de la chaleur.

2.2.1 - Les apports liés à notre alimentation

Les aliments contiennent de la matière minérale (eau, sels minéraux…) et des molécules organiques dont certaines (glucides, lipides, protides) contiennent une énergie chimique. Les *aliments* ingérés vont être transformés en *nutriments* de petite taille grâce aux enzymes (protéines ayant une action spécifique) contenues dans les sucs digestifs. Les nutriments (substances organiques ou minérales absorbables) sont absorbés par l'intestin grêle et sont acheminés vers les organes grâce à la circulation sanguine. Les nutriments sont absorbés par les cellules au niveau des capillaires sanguins.

L'organisme peut stocker certains nutriments comme le glucose (sous forme de glycogène) dans le foie et dans les muscles et stocker des acides gras dans le tissu adipeux. En cas d'*activité physique*, les muscles puisent dans le sang du glucose

COURS

et des acides gras libérés par le foie et le tissu adipeux. Leur transformation libère de l'énergie chimique et de l'énergie thermique.

2.2.2 - Le métabolisme cellulaire, producteur de chaleur

Le *métabolisme* correspond à l'ensemble des transformations chimiques ayant lieu dans l'organisme (création et destruction de molécules).

Grâce au métabolisme, les cellules dégradent les molécules organiques et récupèrent ainsi l'énergie qu'elles contiennent sous la forme d'une molécule énergétique : l'ATP (Adénosine TriPhosphate). Il existe deux grandes voies métaboliques cellulaires permettant de produire de l'énergie thermique : la respiration cellulaire et les fermentations.

- La *respiration cellulaire* nécessite la présence de mitochondries. Il s'agit d'une suite de transformations chimiques dégradant les molécules de glucose en CO_2 et H_2O. Au cours de ces transformations, de nombreuses molécules d'ATP sont synthétisées. L'hydrolyse (destruction) de ces molécules d'ATP fournira aux cellules une grande quantité d'énergie. Lors de la respiration cellulaire, environ 40 % de l'énergie contenue dans les nutriments sont convertis en énergie chimique (ATP) et 60 % sont convertis en énergie thermique. De plus, lorsque l'énergie contenue dans l'ATP est utilisée pour permettre une activité cellulaire, la moitié de son énergie est de nouveau dissipée sous forme de chaleur. Ainsi, plus de 80 % de l'énergie contenue dans nos aliments sont à l'origine de notre chaleur interne.

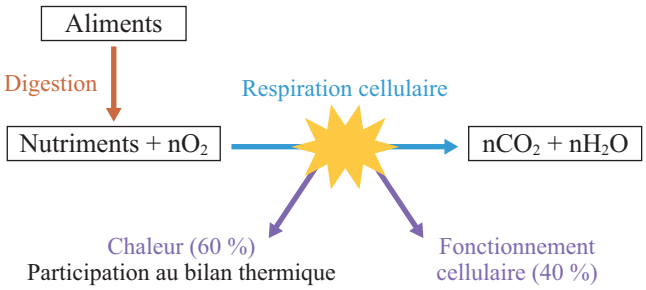


Figure 7.2 – La respiration cellulaire libère de l'énergie utilisable par la cellule

- Les *fermentations* sont aussi possibles dans l'organisme en absence d'O_2. On distingue la fermentation lactique, qui a lieu dans nos muscles, et permet d'obtenir des acides lactiques, et la fermentation alcoolique (comme peuvent le réaliser les levures) aboutissant à la création de molécules d'éthanol. Au cours de la fermentation, seules deux molécules d'ATP sont produites. Par ailleurs les molécules obtenues contiennent encore de l'énergie chimique la dégradation étant incomplète.

Remarque : les réserves d'ATP sont si réduites (quelques centaines de grammes), qu'elles ne permettent au corps de fonctionner que quelques secondes. L'ATP doit être régénérée en permanence.

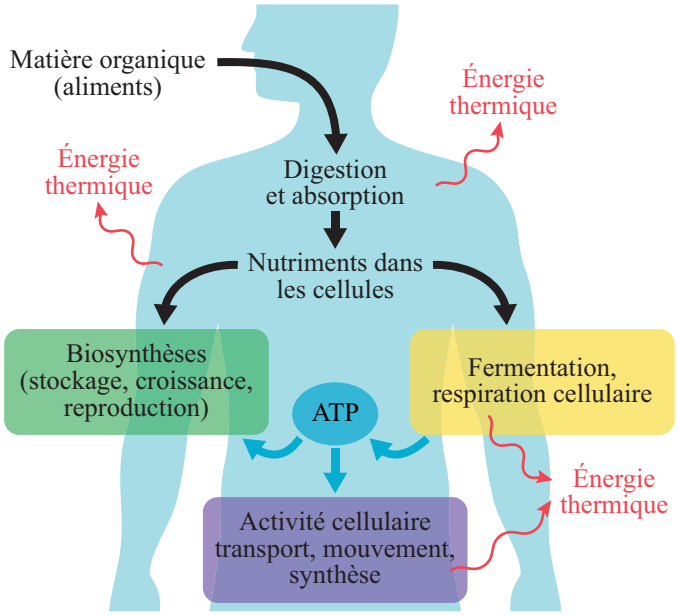


Figure 7.3 – Vue d'ensemble du métabolisme

À RETENIR

La température du corps humain est en permanence autour de 37°C, alors que la température de l'environnement est bien souvent inférieure. Des échanges de chaleur peuvent se faire avec l'extérieur par conduction, convection, rayonnement et évaporation. À l'inverse, le corps humain produit de la chaleur, notamment à partir de la chaleur libérée par les nutriments issus des aliments absorbés. Des processus métaboliques, comme la respiration cellulaire ou les fermentations, permettent de convertir l'énergie des nutriments en énergie utilisable par les cellules (ATP). Ces conversions d'énergie s'accompagnent d'un transfert thermique. La puissance thermique libérée par un corps humain est de l'ordre de 100 W au repos.

COURS

3 Les besoins énergétiques de l'organisme

PROBLÉMATIQUE

Quels sont les besoins énergétiques de l'organisme ?

Les dépenses énergétiques journalières (en kJ ou kcal) d'un individu sont réparties en 4 postes : le métabolisme de base, l'activité physique, la thermorégulation et le travail digestif.

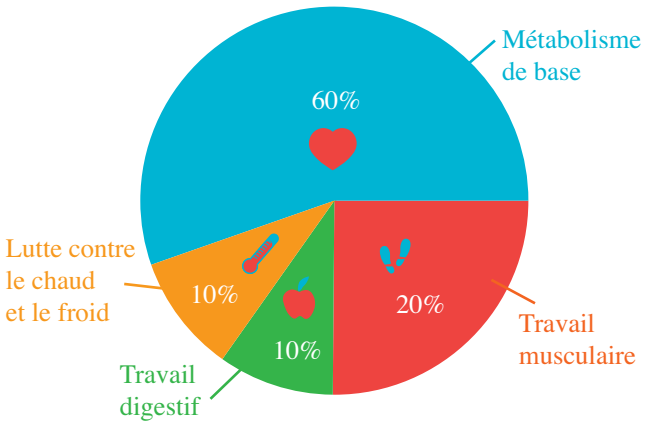


Figure 7.4 – Les différents postes de dépnses énergétiques

La majorité de nos dépenses énergétiques en ATP correspondent au *métabolisme de base*, ce sont des dépenses irréductibles. Il correspond aux dépenses énergétiques nécessaires pour assurer les fonctions vitales de l'organisme, il est mesuré à jeun au repos. Il dépend du sexe, de la masse, de la taille, et de l'âge. On estime qu'il est nécessaire d'avoir un apport énergétique d'environ 7 500 à 6 700 kJ par jour pour un homme et entre 6 300 et 5 400 kJ par jour pour une femme.

Lors d'évènements comme un effort musculaire, en cas de digestion ou de lutte contre le froid ou le chaud, une dépense énergétique supplémentaire est nécessaire (soit une production d'ATP plus importante). Ces différentes dépenses peuvent ainsi influencer l'équilibre thermique. Par exemple, un effort physique supplémentaire (donc entraînant une plus grande production de chaleur) augmentera la quantité d'énergie libérée par évaporation ou accentuera les mécanismes de convection (due à une augmentation des mouvements respiratoires).

Voir exercice 5 page 177, et 6 page 177.

4 La régulation du bilan thermique

PROBLÉMATIQUE

Comment s'équilibre le bilan thermique ?

Retrouvez une vidéo sur la régulation thermique du corps avec live

Le bilan thermique est équilibré : cela signifie que production de chaleur et pertes thermiques sont compensées. En cas d'écart par rapport à la température de référence (37 °C), une boucle de régulation appelée *thermorégulation* se met en place. C'est un mécanisme de régulation de l'énergie thermique du corps permettant de revenir à 37 °C grâce à des réactions comportementales (aller à l'ombre…) et physiologiques.

Tout écart est enregistré par des capteurs sensoriels situés au niveau de la peau et des organes profonds. Ils transmettent l'information à l'hypothalamus (centre de contrôle de la régulation thermique situé dans le cerveau).

- Si la température devient supérieure à 37 °C (hyperthermie), des mécanismes de *thermolyse* sont déclenchés par l'hypothalamus afin d'abaisser la température : ventilation accélérée (expulsion de plus d'air chaud), forte transpiration, vasodilatation etc.
- Si la température est trop basse (hypothermie), l'hypothalamus envoie des ordres aux organes afin de favoriser la création de l'énergie thermique (*thermogénèse*) Par exemple, via l'horripilation (chair de poule), des claquements de dents, des frissons, une vasoconstriction des vaisseaux etc.

Remarque : si les vaisseaux (artérioles surtout) se dilatent, l'apport de sang chaud dans la peau s'accroît. Cela permet de libérer plus d'énergie thermique par transpiration voire directement vers l'extérieur. En cas de situation très froide, la vasoconstriction limite le flux sanguin dans les membres donc leur température baisse, la chaleur est maintenue dans le compartiment central au niveau des organes vitaux.

Des réponses comportementales permettent d'amplifier cette réponse physiologique.

Voir schéma page suivante.

COURS

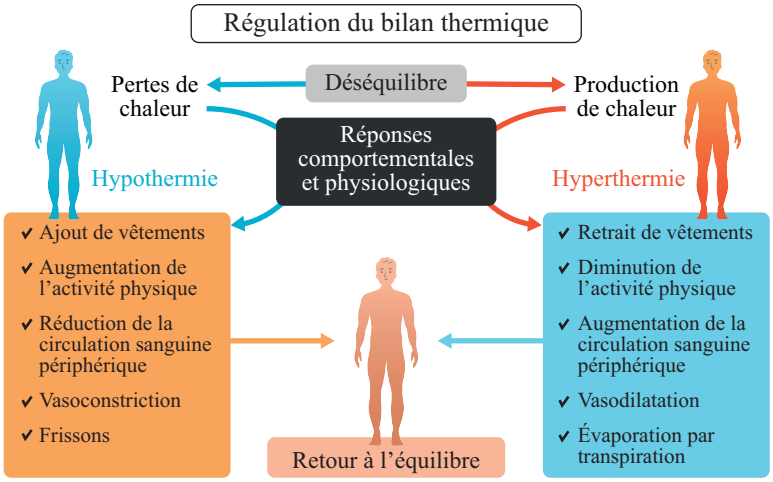


Figure 7.5 – Mécanismes de régulation du bilan thermique

À RETENIR

L'équilibre entre les gains et les pertes d'énergie thermique est dû à une boucle de régulation, appelée *thermorégulation*. Celle-ci permet le maintien d'une température corporelle stable, quelle que soit la température extérieure. Lorsque l'hypothalamus, centre de contrôle, détecte une hypothermie, des mécanismes de thermogenèse se mettent en place. À l'inverse, en cas d'hyperthermie, des mécanismes de thermolyse permettent d'abaisser la température du corps.

Voir exercices 7 page 177 et 9 page 180.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 182

Choisissez la bonne réponse pour chaque série de propositions.

1 Si les gains en énergie thermique sont supérieurs aux pertes par transfert thermique, alors la température du corps :

- **a** augmente ;
- **b** reste stable ;
- **c** diminue.

2 L'organisme et le milieu extérieur échangent de l'énergie par :

- **a** conduction, convection et rayonnement ;
- **b** évaporation uniquement ;
- **c** conduction et irradiation.

3 Si on tient dans ses mains un objet à 20 °C, un transfert thermique a lieu :

- **a** du corps humain à l'objet par convection ;
- **b** du corps humain à l'objet par conduction ;
- **c** de l'objet au corps humain, car conviction.

4 Le corps humain émet un rayonnement dans le domaine :

- **a** de la lumière visible ;
- **b** des ultraviolets ;
- **c** de l'infrarouge.

5 Si la température de l'air est de 40 °C, alors la température du corps humain peut diminuer par :

- **a** conduction entre le corps humain et l'air ;
- **b** convection de l'air autour du corps humain ;
- **c** vaporisation.

6 En présence d'O_2, les cellules convertissent les nutriments en ATP grâce à :

- **a** la respiration ;
- **b** la fermentation ;
- **c** l'évaporation.

7 La puissance thermique émise par le corps humain au repos est d'environ :

- **a** 1 J ;
- **b** 5 J ;
- **c** 100 W ;
- **d** 75 W.

INTERROS

8 Lequel de ces constituants a une valeur énergétique nulle pour l'organisme humain :

- **a** l'eau ;
- **b** un jus de fruit ;
- **c** un morceau de sucre ;
- **d** une salade.

9 L'énergie chimique des aliments est transformée :

- **a** en énergie cinétique seulement ;
- **b** en énergie chimique seulement ;
- **c** en énergie chimique et en énergie thermique ;
- **d** en énergie cinétique et en énergie thermique.

10 L'ATP est une molécule :

- **a** fabriquée principalement par respiration celullaire ;
- **b** présente en grande quantité dans la cellule ;
- **c** fabriquée en grande quantité lors de la fermentation.

11 La respiration cellulaire est un processus :

- **a** présent dans les cellules à l'exception des cellules musculaires ;
- **b** se déroulant uniquement en présence de dioxygène ;
- **c** se déroulant uniquement en présence de dioxyde de carbone.

2 V/F Vérification des connaissances

5 min Corrigé p. 182

Indiquer si chacune des propositions est correcte ou non.

1 Notre température corporelle est toujours égale à 37 °C.

2 Les nutriments sont digérés en aliments absorbés par l'intestin grêle. On peut ensuite les transformer et les stocker dans les cellules.

3 La fermentation et la respiration cellulaire produisent de l'ATP source d'énergie thermique et chimique pour les cellules ayant recours à ces métabolismes.

3 V/F Vérification des connaissances

5 min Corrigé p. 182

Développer les points suivants.

1 Citer les quatre modes de déperdition thermique de l'organisme.

2 Citer et comparer les principales voies métaboliques de production d'ATP.

3 Préciser ce qu'est le métabolisme et ce qu'il comprend.

4 Schéma de pertes thermiques

★ — 5 min — Corrigé p. 183

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

Réaliser un schéma des pertes thermiques de l'organisme.

5 Une journée de sportif

★ — 5 min — Corrigé p. 183

Lycée Sophie Germain, Paris

1. Calculer l'apport énergétique journalier total d'un sportif, si son petit déjeuner lui apporte 1 700 kJ, soit 25 % de ses besoins.
2. Lors d'un entraînement intense, l'apport journalier doit être augmenté de 70 %. Déterminer l'apport énergétique journalier pour une telle journée.

6 Efforts comparés

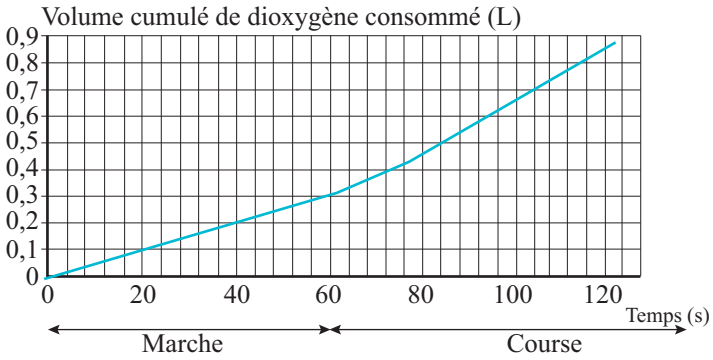
★ — 5 min — Corrigé p. 184

Lycée du Loquidy, Nantes

Un sportif s'entraîne à courir. Il commence par marcher pendant une minute, puis se met à courir.

À partir du document suivant, comparer les valeurs de l'énergie libérée par le sportif quand il marche, et quand il court. Donner les valeurs en Joules sachant que l'équivalent calorifique d'un litre de dioxygène est variable, mais proche de 20 kJ.

Document : volume de dioxygène consommé par le sportif au cours du temps, au repos et à l'effort.



7 Les mondiaux d'athlétisme de Doha, 2019

★★ — 20 min — Corrigé p. 184

Lycée « en forêt », Montargis.

Laurent Grelot titre dans son article sur les marathoniennes des mondiaux d'athlétisme de Doha en 2019 : « *Mondiaux d'athlétisme de Doha : quand le climat ruine les performances et menace les athlètes* ».

Nous allons essayer de comprendre comment le corps des athlètes du marathon a réagi dans ces conditions extrêmes.

« Doha se situe au Qatar, pays de climat désertique. Au moment des mondiaux, la température extérieure était de 32°C et le taux d'humidité de 74%.

Durant un marathon féminin, la vitesse de déplacement est de l'ordre de 18 km/h. La production thermique est très forte et la chaleur métabolique à dissiper très élevée. Dans ces conditions, la température centrale peut atteindre 41,9 °C ! Pour limiter son élévation, la transpiration est le mécanisme physiologique le plus efficace. À condition que la sueur arrivant sur la peau s'évapore, c'est-à-dire soit absorbée par l'air ambiant.

Or durant la course de Doha-2019, l'humidité relative était très élevée (74%). La sueur des marathoniennes a ruisselé vers le sol elle ne s'est pas évaporée.

Dans des conditions si « agressives », l'organisme des marathoniennes se retrouve confronté à un problème : le flux sanguin artériel doit apporter du dioxygène vers les muscles actifs, tandis que le flux sanguin cutané doit lui aussi être augmenté, pour préserver la température centrale en augmentant la sudation. Une compétition se met en place entre ces 2 besoins majeurs, celui de la performance motrice et celui de la régulation thermique centrale. Normalement, pour éviter une hyperthermie potentiellement fatale, le besoin de régulation thermique prime, ce qui explique l'effondrement de la performance, par abaissement du débit sanguin musculaire. »

Source : https ://theconversation.com/mondiaux-dathletisme-de-doha-quand-le-climat-ruine-les-performances-et-menace-les-athletes-124534.

À partir des extraits de cet article et de vos connaissances, exposer à l'aide d'un texte illustré de deux schémas les échanges d'énergie réalisés entre une marathonienne et le milieu extérieur, dans les conditions suivantes :

- Marathon couru à Londres aux JO de 2012, le 5 août, sous la pluie, en fin de matinée.
- Marathon couru en 2019 aux mondiaux d'athlétisme de Doha dans la nuit.

8 La chambre calorimétrique de Benedict et Atwater ★★

20 min Corrigé p. 186

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

La chambre calorimétrique de Benedict et Atwater permet de déterminer la dépense énergétique d'un humain en mesurant :

- la chaleur perdue sous forme de rayonnement, appelée chaleur sensible,
- l'énergie utilisée pour l'évaporation pulmonaire et cutanée appelée chaleur latente.

La chambre calorimétrique est isolée thermiquement et parcourue par un flux d'eau qui circule dans un serpentin. Cette eau est chauffée par la chaleur sensible. La masse d'eau issue de l'évaporation est récupérée et pesée.

La chaleur sensible est calculée en appliquant la formule :

$$Q_1 = M(T_2 - T_1) \times 4{,}18$$

avec Q_1 en kj ; M (en kg) : la masse d'eau qui a circulé dans le serpentin ; T_1 (en °C) : la température initiale de l'eau ; T_2 (en °C) : la température de sortie de l'eau ; 4,18 : la chaleur massique de l'eau en $kJ.kg^{-1}.°C^{-1}$.

L'eau vaporisée est adsorbée dans un flacon contenant de l'acide sulfurique dont la masse est déterminée avant et à la fin de l'expérience. La différence de masse correspond à la masse d'eau évaporée grâce à la chaleur latente.

La chaleur latente est calculée en appliquant la formule :

$$Q_2 = 2{,}4 \times m$$

avec Q_2 en kJ ;

m (en g) : la masse d'eau vaporisée ;

2,4 : la chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/g.

L'énergie totale dépensée est $Q = Q_1 + Q_2$.

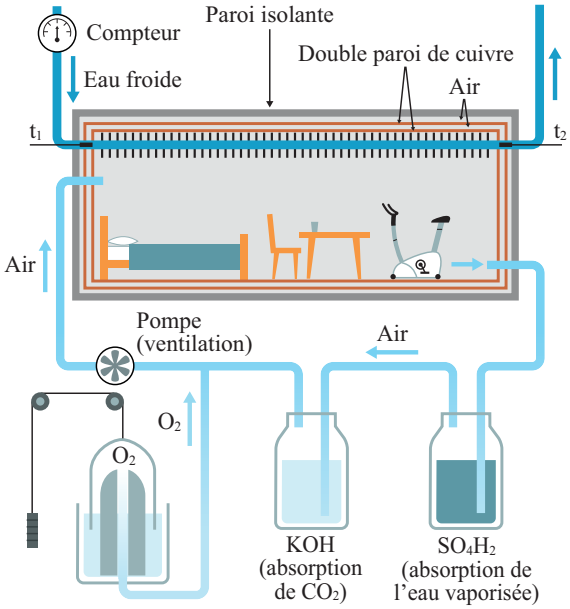


Figure 7.6 – Illustration de la chambre calorimétrique de Atwater et Benedict.

Des mesures ont été faites sur 24 heures. L'homme était au repos.

Durant l'expérience :

- La température de l'eau à l'entrée était de 18°C et à la sortie de 20°C.
- Le volume d'eau qui a circulé a été de 925 litres.
- 875 g d'eau perdue par le sujet par transpiration et évaporation pulmonaire ont été recueillis.

Durant ce temps, l'individu a reçu une alimentation mixte : 380 g de glucides, 75 g de protides, 50 g de lipides.

1 Que mesure-t-on dans la chambre calorimétrique de Benedict et Atwater ? Justifier que cette mesure permet d'évaluer la dépense énergétique d'un être humain.

2 Calculer la puissance thermique libérée par le sujet. On donne 1 W = 1 $J.s^{-1}$.

3 Préciser, en argumentant, si le bilan des apports et des dépenses d'énergie du sujet est en équilibre.

On donne :

- 1 g de lipides = 38 kJ,
- 1 g de glucides = 17 kJ,
- 1 g de protéines =17 kJ.

9 Attention, mains froides !

★★★ 40 min Corrigé p. 187

Lycée « en forêt », Montargis

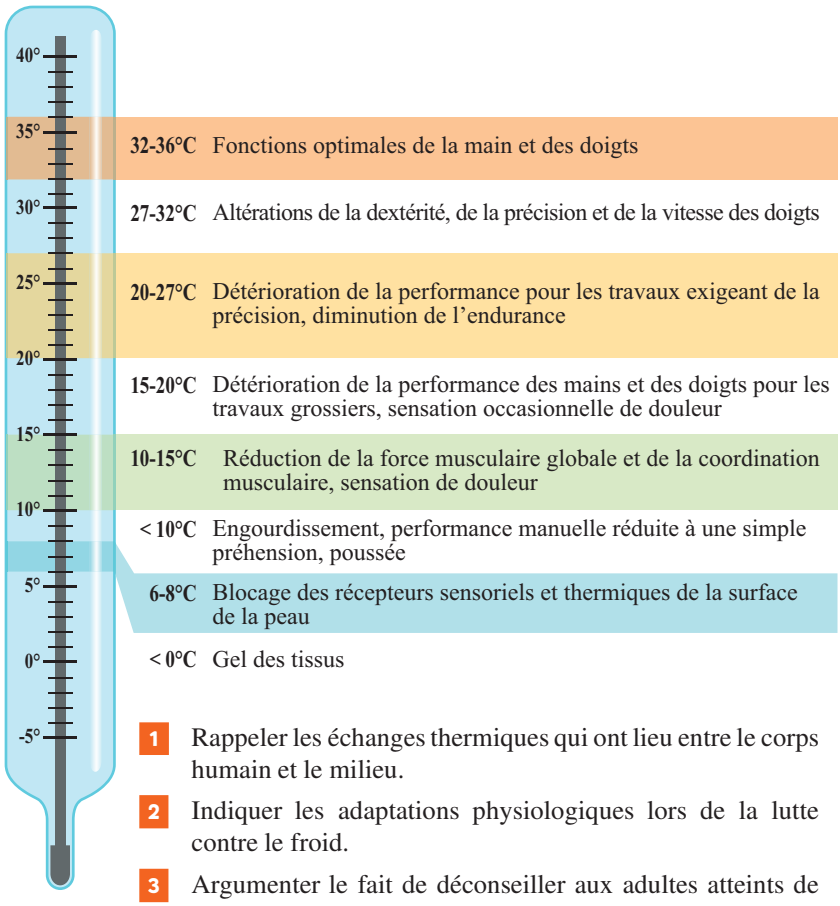
La maladie de Raynaud est une réaction physiologique excessive au froid. Les adultes atteints de cette maladie ont les doigts et les orteils (parfois les oreilles et le bout du nez) qui deviennent blancs en quelques secondes lors d'un stress, ou quand ils sont exposés au froid. Ces extrémités perdent leur sensibilité et deviennent froides et douloureuses. Les personnes en crise ne peuvent plus réaliser de mouvements précis avec leurs doigts. Il suffit de mettre les doigts dans de l'eau tiède pour que les organes récupèrent leur couleur et leur dextérité.

Document 1 :

Pour comprendre la base physiologique du phénomène, des doppler (radiographies de l'irrigation sanguine des organes) ont été réalisés. Le doppler étudie le débit du sang dans les artères et les veines, donnant ainsi des renseignements sur ses conditions d'écoulement et la bonne irrigation des organes. On a mesuré ainsi les débits sanguins dans les doigts dans plusieurs situations. Une mesure de la température des doigts a aussi été réalisée.

Conditions de la mesure	Débit sanguin dans les doigts (unité arbitraire)	Température estimée (en °C)
Adulte non malade dans une salle de température 24°C	100	32°C
Adulte non malade dans une salle de température 5°C	60	25°C
Adulte malade en crise	10	14°C

Document 2 : Performances des mains en fonction de leur température.



1. Rappeler les échanges thermiques qui ont lieu entre le corps humain et le milieu.
2. Indiquer les adaptations physiologiques lors de la lutte contre le froid.
3. Argumenter le fait de déconseiller aux adultes atteints de la maladie de Raynaud de faire de la moto même avec des gants.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 175

1 Réponse a.
2 Réponse a.
3 Réponse b.
4 Réponse c.
5 Réponse c.
6 Réponse a.
7 Réponse c.
8 Réponse a.
9 Réponse c.
10 Réponse a.
11 Réponse b.

2 V/F Vérification des connaissances

Enoncé p. 176

1 Faux ; au niveau de la peau, elle est légèrement inférieure, en cas d'hypothermie elle descend au-dessous de 30 °C et en cas d'effort musculaire ou de fièvre, elle peut dépasser 40 °C.

2 Faux : les aliments sont transformés en nutriments qui sont absorbés et peuvent être stockés. Lors de cette transformation dans le tube digestif, de l'énergie thermique est produite. Mais c'est surtout la transformation du glucose absorbé qui donnera par respiration cellulaire dans les cellules le plus d'énergie thermique.

3 Vrai. De l'ATP est produite et de l'énergie thermique. L'hydrolyse de l'ATP fournira de l'énergie chimique pour le travail cellulaire et là encore de l'énergie thermique.

3 V/F Vérification des connaissances

Enoncé p. 176

1 Le corps humain perd de l'énergie thermique de quatre façons : par rayonnement IR, par conduction avec les objets, par convection et par évaporation.

2 Les principales voies métaboliques sont la respiration cellulaire et la fermentation. La respiration nécessite la présence d'O_2 et produit beaucoup d'ATP contrairement à la fermentation (sans O_2 et produisant peu d'ATP).

3 Le métabolisme est caractérisé par la création et la destruction de molécules. Il y a quatre postes nécessitant de l'énergie pour le métabolisme : le métabolisme de base (pour les fonctions vitales, calculé au repos) pour le travail digestif (après la prise d'un repas), par la lutte contre le froid et le chaud et pour le travail musculaire en cas d'effort.

4 Schéma de pertes thermiques

Enoncé p. 177

Lycée Petitval, Sucy-en-Brie

Les valeurs (en watts) sont données à titre informatif. Elles n'étaient pas attendues dans la réponse.

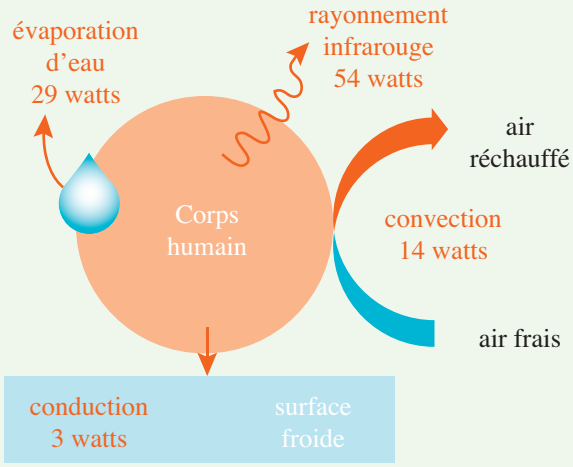


Figure 7.7 – Modes de transfert thermique entre le corps humain et son environnement

5 Une journée de sportif

Enoncé p. 177

Lycée Sophie Germain, Paris

1

Petit déjeuner	25 %	1 700 kJ
Total	100 %	x

$$x = \frac{100 \times 1\,700}{25} = 6\,800$$

donc ses apports journaliers doivent être de 6 800 kJ.

2

Apports journaliers	100 %	6 800 kJ
Total	170 %	x

$$x = \frac{170 \times 6\,800}{100} = 11\,560$$

donc ses apports en cas d'effort doivent être de 11 560 kJ.

6 Efforts comparés

Enoncé p. 177

Lycée du Loquidy, Nantes

D'après le graphique, on voit qu'au bout d'une minute ($t = 60$ s) de marche, notre sportif a consommé 0,3 L de dioxygène, soit $0{,}3 \times 20 = 6$ kJ.

Pendant qu'il courait ($t = 60$ s à $t = 120$ s), il a consommé en tout :

$$0{,}85 - 0{,}3 = 0{,}55 \text{ L de } O_2.$$

Il a donc dépensé $0{,}55 \times 20 = 11$ kJ.

Le sportif dépense presque deux fois plus d'énergie quand il court que lorsqu'il marche (11 kJ au lieu de 6 kJ).

7 Les mondiaux d'athlétisme de Doha, 2019

Enoncé p. 177

Lycée « en forêt », Montargis.

Lors d'un marathon, la température centrale du corps peut atteindre 41,9°C. Nous savons qu'il existe des capteurs thermiques qui vont informer l'hypothalamus de cet écart à la température de référence de 37°C. Dans ce cas d'hyperthermie, l'hypothalamus déclenche une série de mécanismes de thermolyse afin d'abaisser la température. Une ventilation accélérée permet l'expulsion d'air chaud, une forte transpiration facilite l'évaporation, ce qui permet d'évacuer plus de chaleur, la vasodilatation des vaisseaux permet d'amener le sang vers les membres les plus externes pour faciliter la libération d'énergie.

Lors du marathon, le sang doit aussi apporter plus d'oxygène aux muscles actifs. L'organisme limite les performances sportives en apportant un peu moins de sang dans les muscles actifs et en rendant performante l'évacuation de l'énergie thermique.

C'est ce qu'il se passe pour la marathonienne des JO de Londres qui a couru dans des conditions climatiques permettant la transpiration, une ventilation efficace et une vasodilatation des vaisseaux de la peau convenable (voir illustration page suivante).

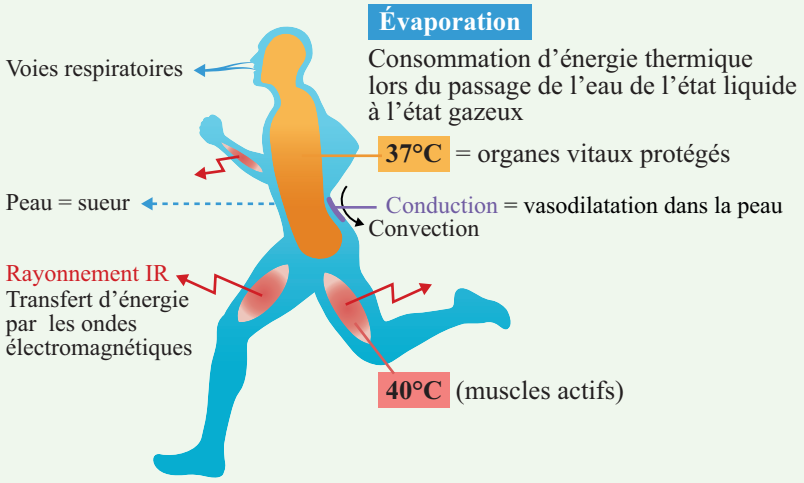


Figure 7.8 – Échanges thermiques entre la marathonienne des JO de Londres et l'environnement

Les mécanismes de thermolyse n'ont pas pu être aussi efficaces pour la marathonienne de Doha. Le fort taux d'humidité de l'air ambiant a empêché la sueur de s'évaporer. La sueur a ruisselé. La perte d'énergie thermique a été moins importante. La thermorégulation étant prioritaire, l'apport en oxygène des muscles a été réduit, les performances sportives ont été moins bonnes.

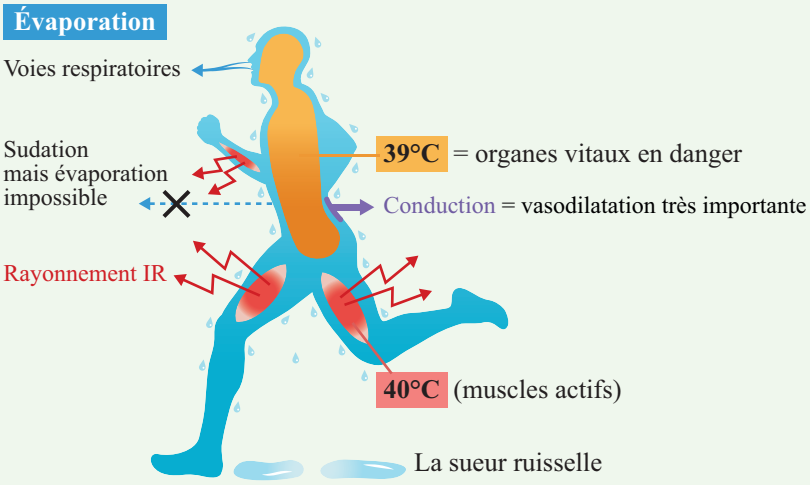


Figure 7.9 – Échanges thermiques entre la marathonienne des mondiaux de Doha et l'environnement

CORRIGÉS

8 La chambre calorimétrique de Benedict et Atwater

Enoncé p. 178

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 On mesure la quantité d'eau perdue par évaporation pulmonaire et cutanée ainsi que la différence de température d'une eau qui circule dans la chambre isolée thermiquement.

Ainsi on mesure les pertes en énergie par évaporation : en effet, on connait la quantité d'énergie qu'il faut pour évaporer un gramme d'eau. On mesure aussi les pertes en énergie par rayonnement, puisqu'on connait la quantité d'énergie nécessaire à l'élévation d'un degré d'une certaine quantité d'eau, et que cette chambre est thermiquement isolée : toute l'énergie thermique provient du corps enfermé dans cette chambre. L'homme perd de l'énergie thermique par rayonnement et évaporation. Donc par des calculs simples, ces mesures permettent d'évaluer les pertes en énergie d'un humain présent dans cette chambre.

2 Calculons d'abord la chaleur sensible.

$$Q_1 = M(T_2 - T_1) \times 4{,}18$$

avec Q_1 en kJ ;

M (en kg) : la masse d'eau qui a circulé dans le serpentin = 925 litres soit 925 kg ;

T_1 (en °C) : la température de l'eau = 18°C ;

T_2 (en °C) : la température de sortie de l'eau = 20°C ;

4,18 : la chaleur massique de l'eau en kJ/kg/°C.

Donc :

$$Q_1 = 925 \times (20 - 18) \times 4{,}18 = 7\,733 \text{ kJ}.$$

Calculons ensuite la chaleur latente :

$$Q_2 = 2{,}4 \times m$$

avec Q_2 en kJ ;

m (en g) : la masse d'eau vaporisée = 875 g ;

2,4 : la chaleur latente de vaporisation de l'eau en kJ/g.

On a ainsi :

$$Q_2 = 2{,}4 \times 875 = 2\,100 \text{ kJ}.$$

Calculons maintenant la puissance thermique en Joules.s^{-1} :

$$Q = Q_1 + Q_2 = 7\,733 + 2\,100 = 9\,833 \text{ kJ sur 24 h}.$$

Donc en 1 h, $Q = \dfrac{9833}{24} = 409{,}7$ kJ.

Donc en 1 s, $Q = \dfrac{409{,}7}{3600} = 114$ J.s^{-1}.

La puissance thermique libérée par le sujet est donc de 114 W.

3 Pour savoir si le bilan des apports et des dépenses énergétiques est équilibré, il faut calculer les apports énergétiques de cet homme pendant les

24 h de mesures dans la chambre. Il a consommé 380 g de glucides, 75 g de protides, 50 g de lipides.

On connaît la valeur énergétique de chaque nutriment. Ainsi on a :

- apport énergétique par les glucides : 380 g $\times$17 kJ/g = 6 460 kJ ;
- apport énergétique par les protides : 75 g $\times$17 kJ/g = 1 275 kJ ;
- apport énergétique par les glucides : 50 g $\times$38 kJ/g = 1 900 kJ ;

soit un total de 6 460 + 1 275 + 1 900 = 9 635 kJ.

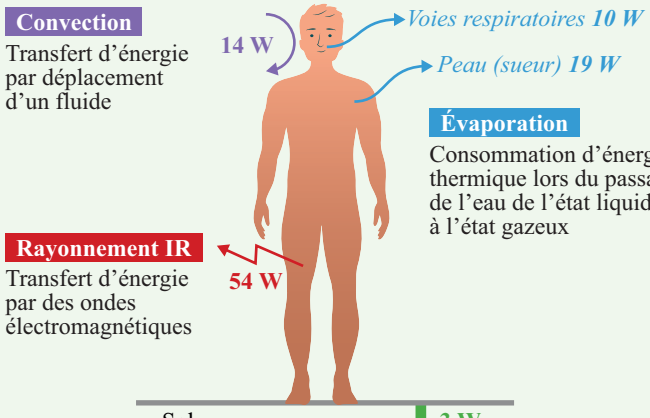
Donc cet individu, a consommé 9 635 kJ et a perdu sur ces mêmes 24h, 9 833 kJ. Normalement, les gains et les pertes thermiques s'équilibrent. Dans ce cas, les gains sont inférieurs aux pertes. Cela signifie que l'individu a puisé dans ses réserves énergétiques pour compenser ses pertes énergétiques. On peut aussi penser que la précision des mesures n'est pas suffisante pour obtenir exactement les mêmes valeurs.

9 Attention, mains froides !

Enoncé p. 180

Lycée « en forêt », Montargis

1 La température du corps humain est en permanence autour de 37°C alors que la température de l'environnement est bien souvent inférieure. Des échanges de chaleur se font avec l'extérieur par conduction, convection, rayonnement et évaporation, comme le montre la figure qui suit (valeurs correspondant à un homme de 1,70 m pesant 70 kg).



2 Lors d'un écart à la température de consigne de 37°C, une boucle de thermorégulation se déclenche. Cette boucle permet d'augmenter la thermogenèse en cas de conditions extérieures froides. L'hypothalamus stimule la thermogenèse via la chair de poule, les claquements de dents,

les frissons. Il favorise aussi la vasoconstriction des vaisseaux sanguins des extrémités et de la peau : les flux sanguins dans ces membres diminuent, leur température aussi, limitant les pertes thermiques. La chaleur est maintenue dans le compartiment central contenant les organes vitaux.

Des comportements comme mettre des vêtements, permettent d'amplifier cette réponse physiologique.

3 On cherche à argumenter le fait de déconseiller aux adultes atteints de la maladie de Raynaud de faire de la moto, même avec des gants.

Elle se manifeste par des doigts blancs et douloureux en cas de froid ou de stress. En outre, la dextérité est perdue lors des crises. Le document 1 montre que ce phénomène physiologique est dû à une vasoconstriction excessive des vaisseaux sanguins. En effet, on voit dans le tableau qu'un adulte soumis à une température de 5 °C a un débit sanguin 6 fois supérieur à celui d'un adulte atteint d'une crise de la maladie de Raynaud.

Quand il fait froid, une crise survient et cause la perte de la dextérité.

Quand on fait de la moto, le vent créé par la vitesse augmente les courants de convection. La température des mains diminue. Le document 2 montre que pour une température des mains de 10-15 °C quand les mains sont douloureuses, la force musculaire et la coordination sont réduites. Or la conduite de la moto nécessite que les mains soient opérationnelles. Cela n'est pas le cas si le motard n'a pas de gants évitant la perte de chaleur par les mains et limitant la convection. Donc le motard doit porter des gants pour pouvoir conduire sans perte de contrôle de son véhicule.

On en conclut que la conduite d'une moto nécessite le port des gants pour limiter la vasoconstriction des vaisseaux des mains et éviter ainsi la perte de la dextérité nécessaire à la conduite. Les adultes atteints de la maladie de Raynaud ont une vasoconstriction excessive en cas de froid ou de stress. Si une crise survenait, la vasoconstriction dans les mains serait plus importante que chez l'adulte non malade. Cette vasoconstriction excessive limiterait les apports en oxygène dans les doigts, empêchant la mobilité musculaire et donc les mouvements des mains. La conduite serait impossible. Donc il est déconseillé aux adultes atteints de cette maladie de conduire une moto.

Troisième partie

LA TERRE, UN ASTRE SINGULIER

Chapitre 8

La forme de la Terre

Plan du chapitre

1. Introduction
2. D'une perception plane à une réalité sphérique
3. Repérages terrestres

1 Introduction

Quand nous regardons autour de nous, l'environnement nous apparaît plan. Pourtant, dès l'Antiquité, on s'interroge sur la forme de la Terre et on cherche à déterminer ses dimensions, particulièrement celles de ses méridiens (demi-cercles passant par les pôles). Par la suite, l'Homme a cherché à déterminer sa position avec un maximum de précision.

PROBLÉMATIQUE

Comment la connaissance de la forme de la Terre a-t-elle permis la détermination de sa circonférence ?

2 D'une perception plane à une réalité sphérique

La connaissance poussée de la géométrie chez les Grecs et les Égyptiens a permis de conclure que la Terre avait une forme sphérique. Les simples interrogations de Platon et Aristote, qui imaginent que la Terre est ronde, vont conduire à réaliser des observations pour confirmer cette hypothèse. Ératosthène va même jusqu'à déterminer la circonférence de la Terre.

Aujourd'hui, grâce aux missions spatiales, les images diffusées au grand public permettent de constater que notre planète est une sphère principalement recouverte d'eau.

2.1 La première mesure de la circonférence de la Terre

Retrouvez la mesure de la circonférence de la Terre en vidéo avec live

Vers 245 avant J.-C., Ératosthène observe, à Alexandrie, l'ombre d'un gnomon (bâton planté verticalement dans le sol, ancêtre du cadran solaire) le jour du solstice d'été, où le Soleil atteint son point le plus haut. Il sait par ailleurs qu'à Syène (aujourd'hui Assouan), considérée comme étant sur le même méridien, à la même

COURS

période de l'année, le fond d'un puits est parfaitement éclairé. Il en déduit que les rayons du Soleil y arrivent parfaitement perpendiculaires à la surface de la Terre.

Deux hypothèses permettent alors à Ératosthène de déterminer géométriquement la circonférence de la Terre :

1. le Soleil est suffisamment éloigné de la Terre pour considérer que ses rayons arrivent parallèles entre eux,
2. la Terre est sphérique, donc toute droite perpendiculaire à sa surface passe par son centre.

Il établit alors une représentation de ses observations.

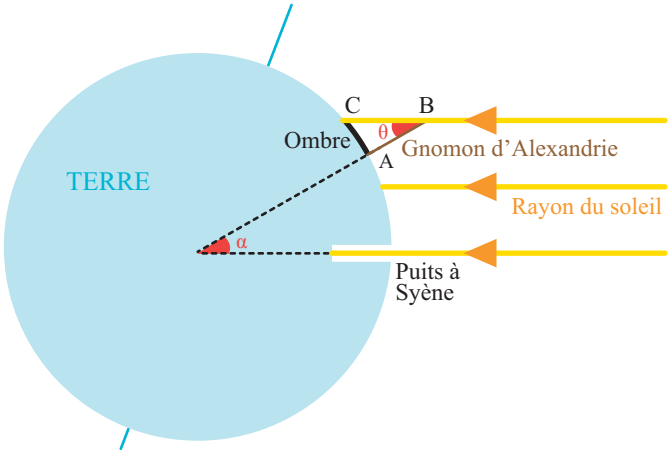


Figure 8.1 – L'expérience d'Ératosthène

Considérons le triangle ABC rectangle en A, alors l'angle θ peut être calculé par la relation :

$$\tan\theta = \frac{AC}{AB} = \frac{\text{longueur de l'ombre}}{\text{hauteur du gnomon}}.$$

En mesurant AC et AB, Ératosthène va pouvoir déterminer $\tan\theta$ puis θ. Il trouve que θ vaut 7,2°. Il en déduit que $\alpha = 7{,}2°$: α et θ sont égaux car ce sont des angles alternes-internes.

Ératosthène va ensuite utiliser deux propriétés mathématiques du cercle :

- la longueur de l'arc de cercle entre Syène et Alexandrie est proportionnelle à l'angle α ;
- l'angle correspondant à un tour complet vaut 360°.

Comme Ératosthène connaissait la distance séparant Syène d'Alexandrie, il fut capable de déterminer la circonférence C de la Terre en appliquant une relation de proportionnalité :

Angle en °	Distance en km
7,2	790
360	C

$$C = \frac{360 \times 790}{7{,}2} = 39\,500 \text{ km}.$$

Il estima donc la circonférence de la Terre à 39 500 km. De nos jours, la valeur réelle est connue et vaut 40 075 km. Ératosthène avait évalué la circonférence de la Terre avec une très bonne précision.

À RETENIR

En observant des ombres lors du solstice d'été, Ératosthène montre que la Terre est une sphère et détermine sa circonférence à l'aide de calculs géométriques simples.

Voir exercice 4 page 203.

2.2 Détermination des longueurs par triangulation

À la fin du XVIII^{e} siècle, les scientifiques souhaitent uniformiser leurs mesures à l'aide d'une unité de référence : le mètre. C'est pour cette raison que deux scientifiques français, Delambre et Méchain, entreprennent de parcourir la distance Dunkerque – Barcelone afin de mesurer le méridien passant par Paris et de définir le premier étalon du mètre, défini comme « le dix millionième du quart du méridien terrestre ». Notons qu'à cette époque, le méridien était défini comme un cercle faisant le tour de la Terre.



Figure 8.2 – Carte du trajet de Delambre et Méchain

COURS

Ils partent chacun de leur côté pour déterminer, par une méthode appelée *triangulation*, les côtés de triangles adjacents successifs à partir de mesures d'angles et d'une longueur précise référente. Leur but est d'en déduire la distance entre Dunkerque et Barcelone.

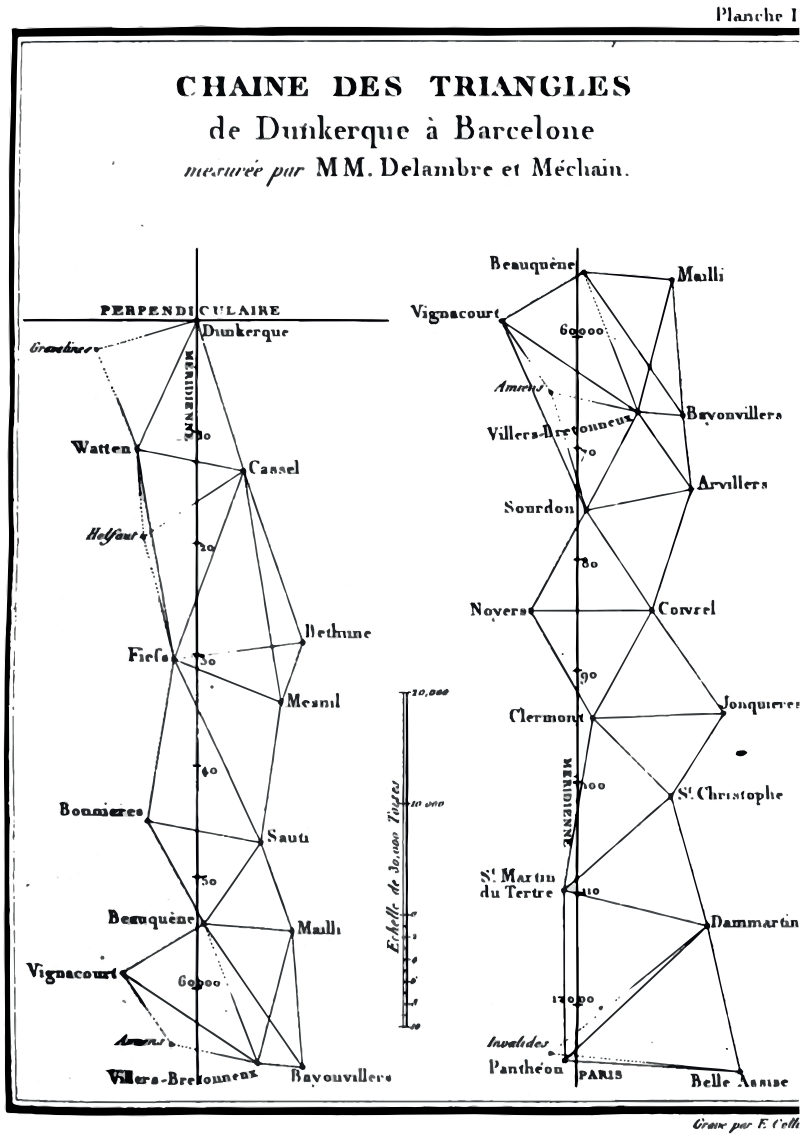


Figure 8.3 – Illustration des triangles de Delambre et Méchain

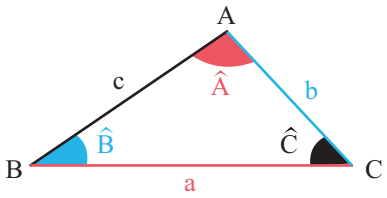
2.2.1 - Principe de triangulation

Dans un triangle, si on connaît la longueur d'un des cotés et deux de ses angles, il est possible de connaître tous les angles ainsi que la longueur de tous les cotés.

Il faut pour cela connaître deux notions mathématiques :

- les sommes des angles d'un triangle vaut 180° : $\widehat{A} + \widehat{B} + \widehat{C} = 180°$;
- la loi des sinus qui s'écrit (en utilisant les notations de la figrue ci-dessous) :

$$\frac{a}{\sin(\widehat{A})} = \frac{b}{\sin(\widehat{B})} = \frac{c}{\sin(\widehat{C})}.$$



Exemple : si l'on connaît les valeurs de a, $\widehat{B}$, $\widehat{C}$, on peut déterminer les grandeurs inconnues :

$$\widehat{A} = 180 - \widehat{B} - \widehat{C} \; ; \; b = \frac{a \times \sin(\widehat{B})}{\sin(\widehat{A})} \; ; \; c = \frac{a \times \sin(\widehat{C})}{\sin(\widehat{A})}.$$

En considérant plusieurs triangles ayant à chaque fois un coté en commun, il est possible de déterminer, de proche en proche, une distance entre deux points très éloignés à partir de la mesure d'une première distance beaucoup plus courte (un des côtés du premier triangle), puis uniquement des mesures d'angles. Ceci est beaucoup plus facile à réaliser précisément sur de grandes distances.

Voir exercice 5 page 204.

C'est ce qu'ont fait Delambre et Méchain. Ils ont ainsi obtenu la distance entre Dunkerque et Barcelone.

Par une autre méthode que nous ne détaillerons pas, Delambre et Méchain ont de plus mesuré l'angle α formé par le centre de la Terre avec Dunkerque et Barcelone. Ils ont alors pu calculer la valeur de la circonférence C de la Terre en utilisant le fait que la longueur d'un arc de cercle est proportionnel à l'angle au centre qui l'intercepte. On peut donc appliquer la relation de proportionnalité :

$$C = \frac{360 \times d_{\text{Dunkerque - Barcelone}}}{\alpha}.$$

Voir schéma page suivante.

COURS

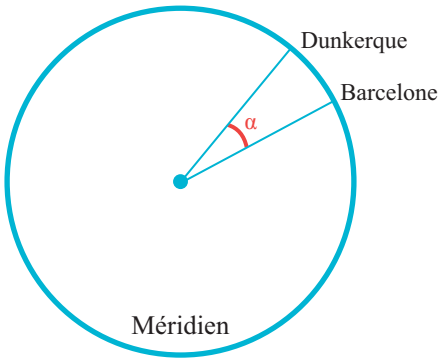


Figure 8.4 – Représentation de l'angle entre Dunkerque et Barcelone

Remarque : Notons que lorsque l'on connaît la circonférence de la Terre, il est facile d'en déduire son rayon. En effet, la circonférence d'un cercle peut être calculée à partir de son rayon, par la relation $C = 2 \times \pi \times r$. Donc le rayon s'exprime par la relation :

$$r = \frac{C}{2\pi}.$$

À RETENIR

La triangulation permet de mesurer une distance à partir de mesures d'angles.
Delambre et Méchain ont déterminé la longueur de la circonférence terrestre par triangulation,
Le rayon de la Terre est calculé par la connaissance de la circonférence terrestre avec la relation :

$$r = \frac{C}{2\pi}.$$

3 Repérages terrestres

Connaissant avec précision le rayon de la Terre, il est possible de déterminer la position d'un point, puis de calculer la distance entre deux points situé à sa surface.

Pour faciliter le repérage, un système de coordonnées a été construit à partir des angles formés par rapport à l'équateur (la *latitude*) et par rapport au méridien de Greenwich (la *longitude*).

Un *parallèle* est le cercle passant par les points de même latitude. Les parallèles les plus connus sont les tropiques du Cancer et du Capricorne. Ces deux parallèles

définissent une zone où le Soleil est au moins une fois par an à la verticale de la surface de la Terre.

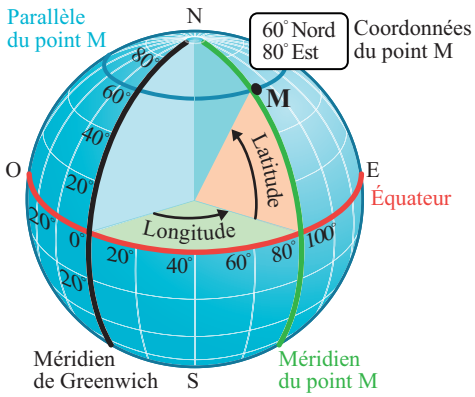
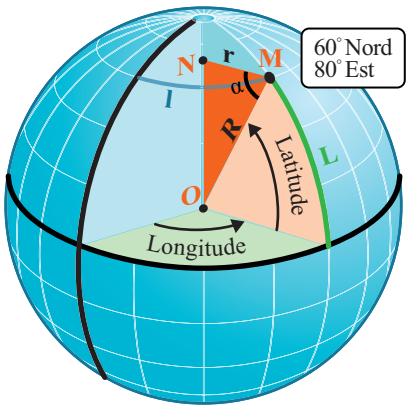


Figure 8.5 – Représentation des coordonnées d'un point M en latitude et longitude

À partir de l'angle au centre et du rayon de la Terre, on peut calculer la longueur de l'arc d'un méridien ou d'un parallèle.



L : arc d'un méridien

l : arc d'un parallèle

α : angle en M dans le triangle OMN

Figure 8.6 – Représentation des arcs de cercle

Exemple avec le point M de la figure précédente

- Calcul de l'arc du méridien, L

  La circonférence de la Terre s'exprime par la relation $C = 2 \times \pi \times R$, où R est le rayon de la Terre. Cette circonférence représente un angle de 360°. Donc en admettant que la longueur d'un arc est proportionnelle à l'angle qu'il décrit, on a :

$$L = \frac{C \times \text{angle au centre}}{360°} = \frac{2 \times \pi \times R \times \text{Latitude}}{360°}.$$

COURS

Donc l'arc du méridien décrit par le point M vaut :

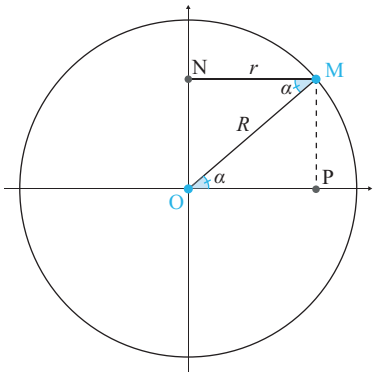
$$L = \frac{2 \times \pi \times 6\,371 \times 60}{360} = 8\,896 \text{ km}.$$

- Calcul de l'arc du parallèle, l

On applique la même relation de proportionnalité mais cette fois le rayon de l'arc ne correspond pas au rayon de la Terre, il est plus petit.

1re étape
On détermine le rayon, r, du parallèle décrit. Plaçons-nous dans le triangle OMN rectangle en N, l'hypoténuse OM est le rayon de la Terre, R. De plus, l'angle α est équivalent à la latitude. Donc :

$$\cos\alpha = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}} = \frac{r}{R} \implies r = R \times \cos\alpha = R \times \cos(\text{latitude}).$$



2e étape
On injecte le rayon dans le calcul de l'arc

$$l = \frac{2 \times \pi \times r \times \text{longitude}}{360} = \frac{2 \times \pi \times R \times \cos(\text{latitude}) \times \text{longitude}}{360}.$$

Donc l'arc du parallèle décrit par M vaut :

$$l = \frac{2 \times \pi \times 6\,371 \times \cos(60) \times 80}{360} = 1\,158 \text{ km}.$$

En connaissant les coordonnées de deux points à la surface de la Terre, la distance qui les sépare est déterminée par un arc de cercle. Celle-ci peut être mesurée en passant par des trajets différents :

- soit à vol d'oiseau, le trajet direct, on parle de trajet *loxodromique* ;
- soit un arc d'un grand cercle passant par les deux villes, on parle alors de trajet *orthodromique*.

ÉTYMOLOGIE

Orthodromie vient du grec « orthos », droit et « dromos », course. Ce mot désigne le plus petit arc du grand cercle passant par deux points.

Loxodromie vient du grec « loxos », oblique et « dromos », course. Ce mot désigne le chemin qui coupe les méridiens avec un angle constant. Sur un planisphère, c'est la droite entre les deux points.

Définition 1

Un *grand cercle* d'une sphère est un cercle passant par deux points situés à la surface et ayant pour centre celui de la sphère.

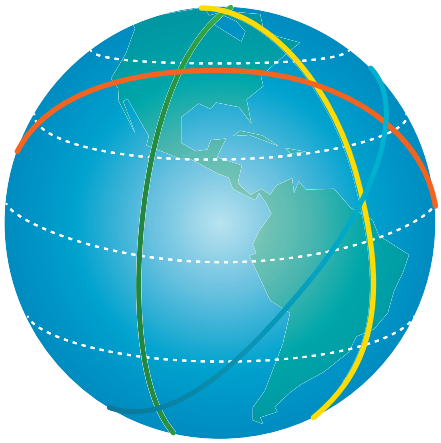
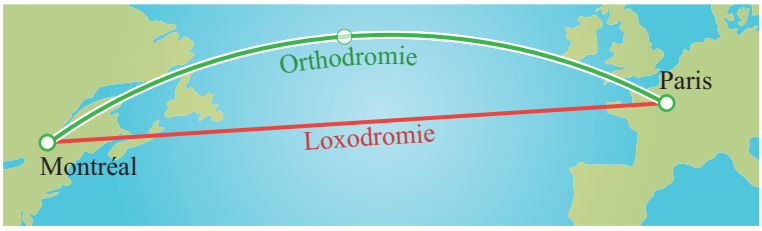


Figure 8.7 – Représentation des grands cercles d'une sphère.

Remarque : à part l'équateur, les parallèles ne sont pas des grands cercles.

Le trajet le plus court est l'orthodromique c'est-à-dire celui qui décrit le plus petit arc de cercle à la surface de la Terre.

Les deux figures qui suivent montrent l'orthodromie et la loxodromie entre Paris et Montréal.



Voir la représentation de ce trajet sur la sphère terrestre page suivante.

COURS

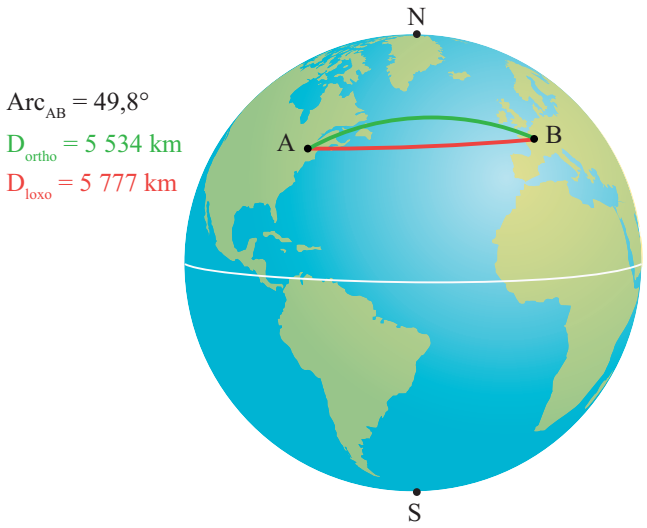


Figure 8.8 – Orthodromie et loxodromie entre deux points de la surface terrestre

En observant le planisphère, nous avons l'impression que le trajet le plus court est le trajet loxodromique. Or on constate que la distance la plus courte sur la sphère est la distance orthodromique, $D_{\text{ortho}} = 5\,534$ km. Notre planète est une sphère, il faut donc prendre en compte cette géométrie lors des mesures de distances.

À RETENIR

On repère un point à la surface de la Terre par deux coordonnées angulaires, sa latitude et sa longitude.

La longueur d'un arc de cercle l est proportionnelle à l'angle α qui l'intercepte et au rayon du cercle, $R : l = \dfrac{2 \times \pi \times R \times \alpha}{360}$.

Le plus court chemin entre deux points à la surface de la Terre est l'arc du grand cercle qui les relie.

Voir exercice 3 page 202.

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 207

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 La forme sphérique de la Terre a été démontrée par :

- **a** l'observation de l'horizon ;
- **b** l'ombre portée de la Terre sur la Lune ;
- **c** l'ombre portée au sol par un gnomon ;
- **d** la trajectoire du Soleil dans le ciel.

2 Le calcul de la circonférence de la Terre à partir de l'ombre d'un gnomon lors du solstice d'été est réalisé par :

- **a** Aristote ;
- **b** Ératosthène ;
- **c** Delambre et Méchain ;
- **d** Platon.

3 Le calcul de la circonférence de la Terre à partir d'une succession de triangles a été réalisé par :

- **a** Aristote ;
- **b** Ératosthène ;
- **c** Delambre et Méchain ;
- **d** Platon.

4 La valeur de la circonférence de la Terre est d'environ :

- **a** 6 000 m ;
- **b** 6 000 km ;
- **c** 12 000 m ;
- **d** 40 000 km.

5 La valeur du rayon de la Terre est d'environ :

- **a** 6 000 m ;
- **b** 6 000 km ;
- **c** 12 000 m ;
- **d** 40 000 km.

6 L'angle repéré par rapport à l'équateur est :

- **a** le méridien ;
- **b** la parallèle ;
- **c** la latitude ;
- **d** la longitude.

INTERROS

7 Le trajet le plus court pour rejoindre deux points à la surface de la Terre :

a passe forcément par les pôles ;

b décrit un arc du grand cercle passant par les deux points ;

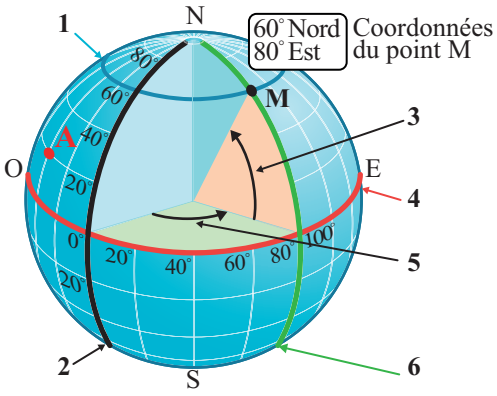
c est un arc du méridien quand les deux points sont sur le même méridien ;

d est un arc du parallèle quand les deux points sont sur le même parallèle.

2 Coordonnées géographiques

★ — 5 min — Corrigé p. 207

Lycée Chaptal, Paris



1 Légender le schéma ci-dessus avec les termes suivants : équateur, méridien, méridien de Greenwich, parallèle, longitude, latitude.

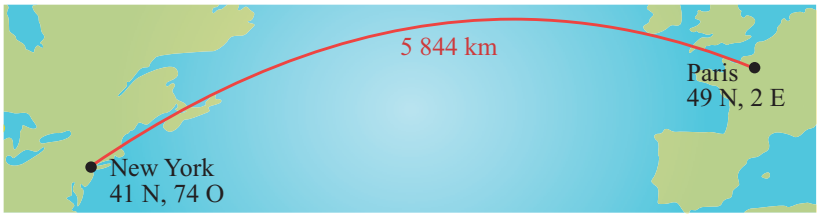
2 Déterminer les coordonnées du point *A*.

3 Le trajet le plus court

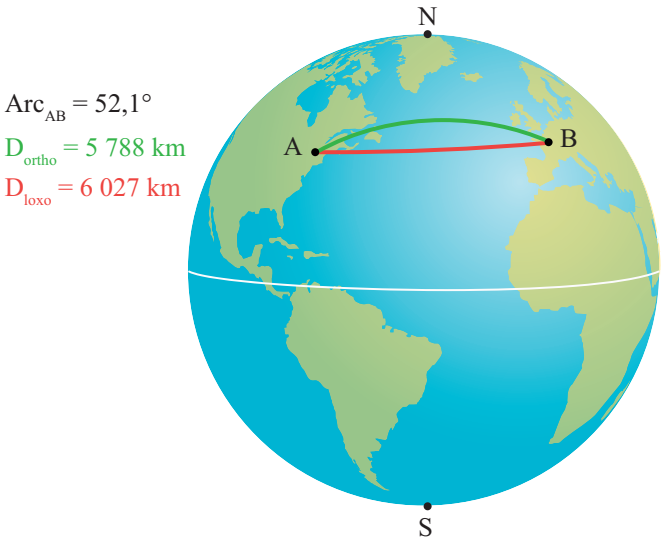
★ — 5 min — Corrigé p. 208

Lycée Alexandre Dumas, Saint-Cloud

Voici la représentation du trajet Paris – New York fournie par le logiciel Google Maps.



Voici une modélisation du même voyage proposant deux trajets :



1. Expliquer pourquoi les avions qui font les vols Paris – New York remontent vers le nord.
2. Donner le type de trajet tracé sur la carte issue de Google Maps.
3. Indiquer comment représenter sur le premier schéma, le 2e trajet proposé par la modélisation.

4 Les travaux d'Ératosthène

★★ 10 min Corrigé p. 208

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

Ératosthène est à Alexandrie le jour du solstice d'été. Il observe à midi du jour où le Soleil est le plus haut de l'année un obélisque de 8 m de haut. L'ombre laissée au sol mesure 1 m, elle est considérée comme droite, et c'est un segment perpendiculaire à l'obélisque. Au même instant à Syène, 800 km plus au Sud, un puits ne possède aucune ombre.

1. Expliquer pourquoi les rayons du Soleil sont considérés parallèles entre eux.
2. Schématiser l'expérience avec une légende, à partir d'un cercle de centre O et de rayon $R = 3$ cm sans vous soucier de l'échelle.
3. Indiquer sur votre schéma :
   - A : le puits de Syène,
   - B : le bas de l'obélisque,

- C : le haut de l'obélisque,
- D : le haut de l'ombre.

4 Donner la nature du triangle BCD.

5 Calculer l'angle $\widehat{BCD}$.

6 Justifier la valeur de l'angle $\widehat{BOA}$.

7 Calculer la circonférence de la Terre.

8 Calculer le rayon R de la Terre.

5 Distance par triangulation

★★ 15 min Corrigé p. 209

Lycée Carnot, Paris

Déterminer la longueur AE à partir des angles donnés et de la distance entre les points A et B, $d_{AB} = 5$ km.

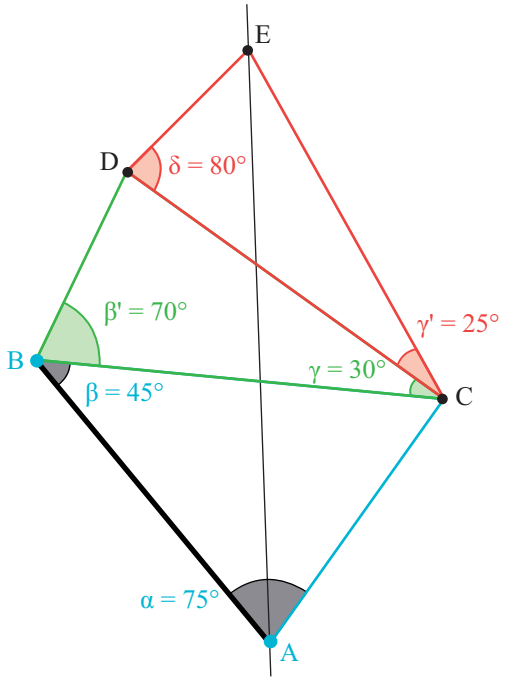


Figure 8.9 – Figure de triangulation d'une distance

La loi des sinus établit la relation suivante :

$$\frac{a}{\sin(\widehat{A})} = \frac{b}{\sin(\widehat{B})} = \frac{c}{\sin(\widehat{C})}$$

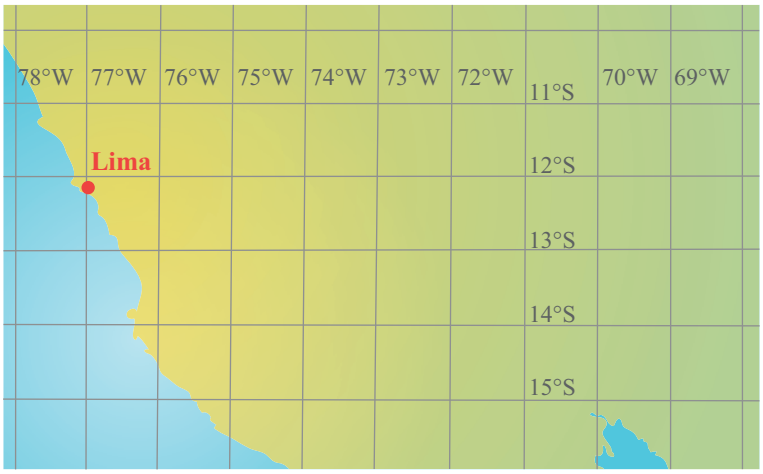
On donne : $\widehat{CAE} = 37{,}5°$.

6 Découvrir l'Amérique du sud

★★ 20 min Corrigé p. 210

Lycée Lakanal, Sceaux

La ville de Lima est la capitale du Pérou, voici sa position dans l'hémisphère sud.



On donne le rayon de la Terre : $R_T = 6\,371$ km.

1. Relever les coordonnées de Lima arrondies au degré.
2. Calculer l'arc du méridien décrit par la position de Lima par rapport à l'équateur.
3. Calculer l'arc du parallèle décrit par la position de Lima par rapport à méridien de Greenwich.
4. Déterminer la longueur du parallèle passant par Lima.

7 Un voyage Strasbourg-Turin

★★ 15 min Corrigé p. 211

Lycée Saint-Martin, Rennes

La famille Strat décide d'aller à Turin pour les vacances. Avant de partir, elle cherche des informations sur le trajet Strasbourg – Turin. Elle commence par des recherches sur Google Maps.

Voir carte page suivante.

INTERROS

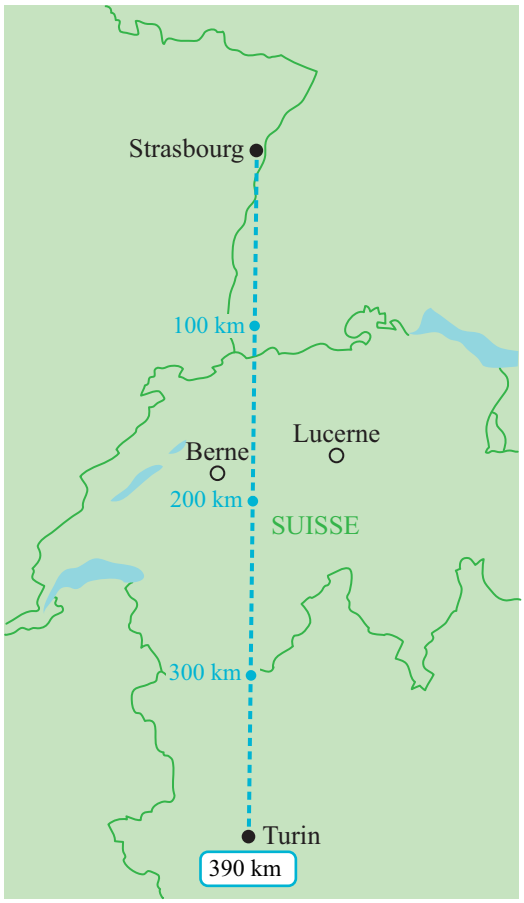


Figure 8.10 – Trajet le plus court entre Strasbourg et Turin

On donne :

- les coordonnées géographiques de Strasbourg : 48,6 N, 7,7 E,
- celles de Turin : 45,1 N, 7,7 E,
- le rayon de la Terre : $R_T = 6\,371$ km.

1 Expliquer le point commun entre les deux villes

2 Représenter ces villes sur une sphère en faisant apparaître leurs coordonnées.

3 Calculer la distance du trajet le plus court entre Strasbourg et Turin.

4 Calculer l'erreur de votre valeur avec la relation $\varepsilon = \dfrac{|d_{\text{théorique}} - d_{\text{calculée}}|}{d_{\text{théorique}}}$ où $d_{\text{théorique}}$ est la valeur donnée par Google Maps.

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 201

1 Réponses b et c. La trajectoire circulaire du Soleil ne permet pas de conclure sur la sphéricité de la Terre. Ce mouvement est aussi apparent dans le cas d'une planète plane.

2 Réponse b.

3 Réponse c.

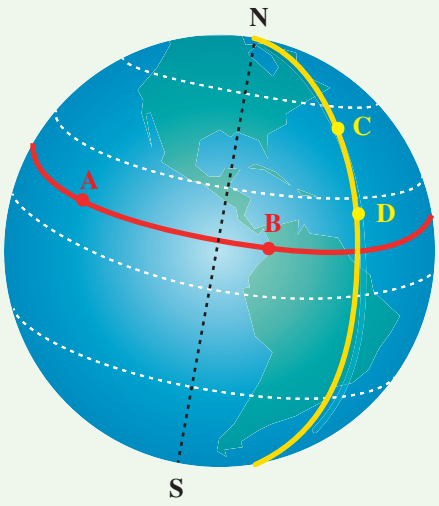
4 Réponse d.

5 Réponse b.

6 Réponse c.

7 Réponses b et c.

Sur la figure suivante, A et B sont sur le même parallèle ; C et D sur le même méridien.



2 Coordonnées géographiques

Enoncé p. 202

Lycée Chaptal, Paris

1
- 1 : parallèle
- 2 : méridien de Greenwich
- 3 : latitude
- 4 : équateur
- 5 : longitude
- 6 : méridien

2 Les coordonnées du point A sont 20° N, 40° O.

CORRIGÉS

3 Le trajet le plus court

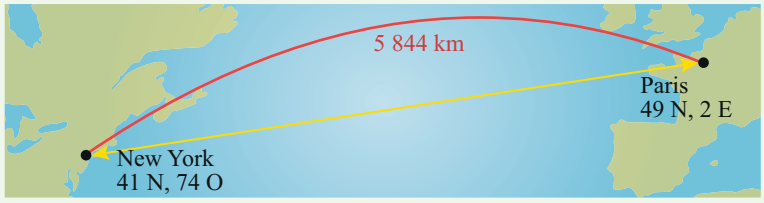
Enoncé p. 202

Lycée Alexandre Dumas, Saint-Cloud

1 D'après la modélisation, le trajet vert est plus court que le trajet rouge donc les avions vont privilégier ce trajet qui passe plus au nord.

2 Le trajet tracé sur la carte issue de Google Maps décrit un arc du grand cercle passant par Paris et New York, c'est la distance orthodromique.

3 Sur la carte issue de Google Maps, il faut tracer une droite entre Paris et New York pour représenter la distance loxodromique.



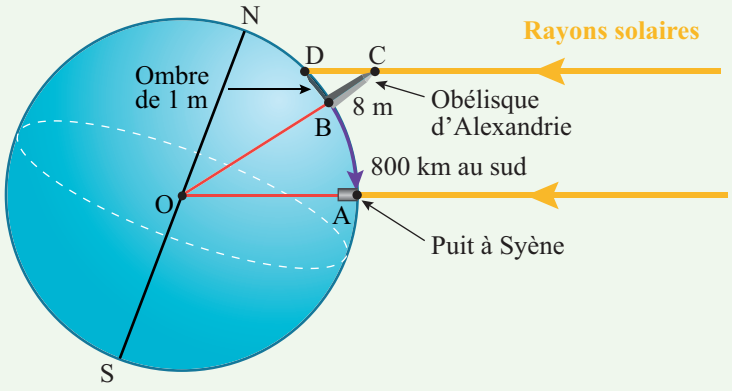
4 Les travaux d'Ératosthène

Enoncé p. 203

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

1 Le Soleil est situé très loin de la Terre donc on peut considérer les rayons comme parallèles entre eux.

2 La figure ci-dessous représente le schéma de l'expérience :



3 Voir la figure ci-dessus.

4 Le triangle BCD est rectangle en B, avec l'approximation que l'ombre est tangente à la surface de la Terre.

5 $\tan \widehat{BCD} = \dfrac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \dfrac{BD}{BC} = \dfrac{1}{8} = 0{,}125.$

Ainsi $\widehat{BCD} = \arctan(0{,}125) = 7{,}1°$.

6 L'angle $\widehat{BOA}$ est alterne-interne avec l'angle $\widehat{BCD}$ donc ils sont égaux.

Ainsi, $\widehat{BOA} = 7{,}1°$.

7 Calcul par proportionnalité. Sachant que 7,1° représente 800 km et qu'un cercle couvre un angle de 360°.

Angle en °	Distance en km
7,1	800
360	C

$$C = \frac{360 \times 800}{7{,}1} = 40\,563 \text{ km}.$$

Donc la circonférence vaut 40 563 km.

La valeur historique est 39 000 km, donc notre valeur trouvée est légèrement supérieure. Ce qui peut s'expliquer par les valeurs entières approximatives utilisées dans cet exercice.

8 La circonférence s'exprime en fonction du rayon de la Terre par la relation : $C = 2 \times \pi \times R$

Donc le rayon s'exprime par : $R = \dfrac{C}{2\pi}$.

$$R = \frac{C}{2\pi} = \frac{40\,563 \text{ km}}{2\pi} = 6\,456 \text{ km},$$

cette valeur trouvée est supérieure à la valeur réelle, $R_T = 6\,371$ km pour la même raison. L'erreur continue de se répercuter dans les calculs.

5 Distance par triangulation

Enoncé p. 204

Lycée Carnot, Paris

Dans un triangle, la somme des angles vaut 180° donc

$$\widehat{BCA} = 180° - (75° + 45°) = 60°,$$

donc l'angle

$$\widehat{ACE} = 60° + 30° + 25° = 115°.$$

$$BC = \frac{AB \times \sin\alpha}{\sin\widehat{ACB}} = \frac{5 \text{ km} \times \sin 75°}{\sin 60°} = 5{,}58 \text{ km}.$$

$$CD = \frac{CB \times \sin\beta}{\sin\widehat{CDB}} = \frac{5{,}58 \text{ km} \times \sin 70°}{\sin 80°} = 5{,}32 \text{ km}.$$

$(180° - 70° - 30° = 80°)$

$$CE = \frac{CD = \sin\delta}{\sin\widehat{DEC}} = \frac{5{,}32 \text{ km} \times \sin 80°}{\sin 75°} = 5{,}42 \text{ km}.$$

$(180° - 80° - 25° = 75°)$

$$AE = \frac{CE \times \sin\widehat{ACE}}{\sin\widehat{CAE}} = \frac{5{,}42 \text{ km} \times \sin 115°}{\sin 37{,}5°} = 8{,}08 \text{ km},$$

donc la distance entre A et E est de 8,08 km.

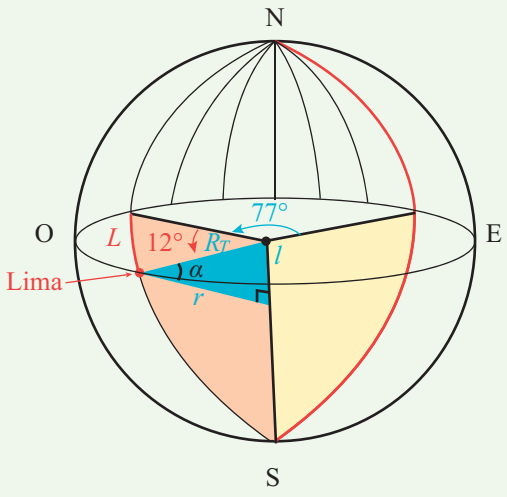
CORRIGÉS

6 Découvrir l'Amérique du sud

Enoncé p. 205

Lycée Lakanal, Sceaux

1 Les coordonnées de Lima sont 77° Ouest, 12° Sud.



2 La circonférence de la Terre est $C = 2\pi R_T$.

L'arc de méridien est intercepté par un angle au centre correspondant à la latitude de Lima. Comme la distance d'un arc de cercle est proportionnelle à l'angle au centre qui l'intercepte, on a :

$$L = \frac{2\pi \cdot R_T \cdot \text{latitude}}{360°} = \frac{2\pi \times 6\,371 \text{ km} \times 12°}{360} = 1\,334 \text{ km}.$$

3 Calcul de l'arc du parallèle, l, qui est un cercle où le centre est situé sur l'axe passant par les pôles et de rayon r.

Dans un premier temps, déterminons r.

$$\cos\alpha = \frac{r}{R_T} \implies r = R_T . \cos\alpha,$$

car le triangle bleu est rectangle (voir représentation ci-dessus).

Comme la longueur de l'arc est proportionnelle à l'angle au centre qui l'intercepte, on a :

$$l = \frac{2\pi \cdot r \cdot \text{longitude}}{360°},$$

soit

$$l = \frac{2\pi \cdot R_T \cdot \cos\alpha \cdot \text{longitude}}{360°} = \frac{2\pi \times 6\,371 \times \cos 12° \times 77°}{360°} = 8\,375 \text{ km}.$$

4 La circonférence d'un cercle de rayon r se calcule grâce à la formule $C = 2\pi r$, donc :

$$C_{\text{parallèle}} = 2\pi r = 2\pi \cdot R_T \cdot \cos(\text{latitude})$$
$$= 2\pi \times 6\,371 \times \cos 12° = 39\,155 \text{ km}.$$

La longueur du parallèle est proche de la circonférence de la Terre car il n'est pas très loin de l'équateur. Plus on se rapproche des pôles, plus la circonférence du parallèle tend vers 0.

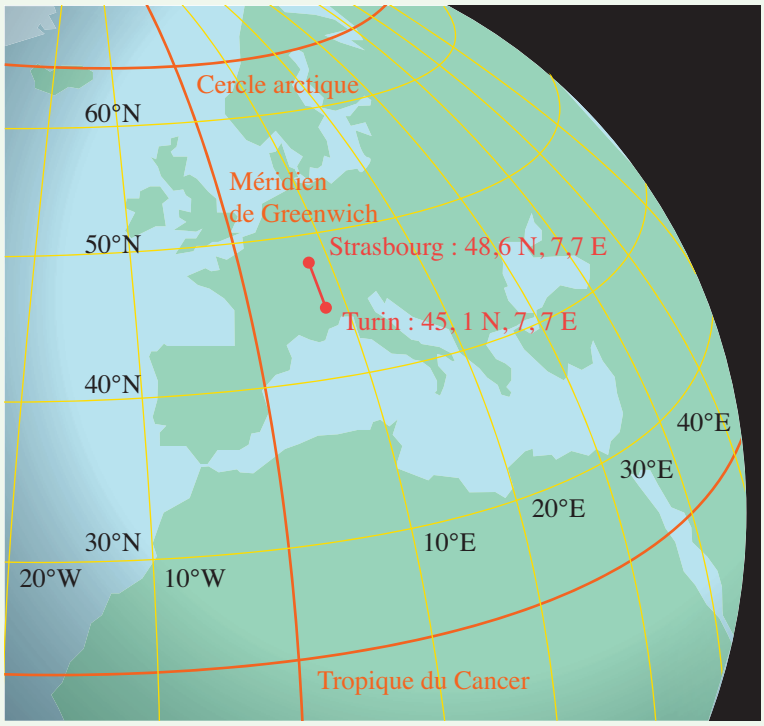
7 Un voyage Strasbourg-Turin

Enoncé p. 205

Lycée Saint-Martin, Rennes

1 Les deux villes ont la même longitude, 7,7° Est. Elles sont donc situées sur le même méridien.

2 La carte ci-dessous est extraite du logiciel Google Earth :



3 Les méridiens sont des grands cercles de la Terre, donc le trajet passant par le méridien est le plus court chemin entre Turin et Strasbourg. En reprenant la formule de l'arc d'un méridien, on peut calculer la distance entre les 2 villes.

Les villes de Strasbourg et de Turin décrivent un angle de

$$48{,}6° - 45{,}1° = 3{,}5°$$

par rapport au centre de la Terre donc la relation s'écrit :

$$d_{\text{S-T}} = \frac{2 \times \pi \times 6\,371\text{km} \times 3{,}5°}{360} = 389\text{ km}.$$

Par le calcul, nous trouvons que la distance entre Strasbourg et Turin est de 389 km.

4 $\varepsilon = \dfrac{|390 - 389|}{390} = 2{,}56.10^{-3}$, soit 0,26 % d'erreur donc les approximations considérant les 2 villes sur le même méridien sont acceptables.

Chapitre 9

L'histoire de l'âge de la Terre

Plan du chapitre

1. Introduction
2. De l'antiquité aux premières estimations
3. Une controverse entre naturalistes et physiciens
4. Une révolution marquée par les apports de la radiochronologie

1 Introduction

Jusqu'au XVII^e siècle, l'âge de la Terre est estimé à quelques milliers d'années en se basant sur les événements de la Bible. Le contexte religieux de l'époque empêche toute remise en question. À partir du XVII^e siècle, de nouvelles théories réévaluent cette valeur à la hausse, quitte à susciter de fortes controverses. À l'heure actuelle, l'âge de la Terre fait consensus dans la communauté scientifique.

PROBLÉMATIQUE

Comment a-t-on estimé l'âge de la Terre au cours du temps ?

2 De l'antiquité aux premières estimations

PROBLÉMATIQUE

Quelles étaient les premières démarches qui ont permis de déterminer un âge de la Terre ?

Dans l'Antiquité, l'Univers est considéré comme immuable et éternel. Pour Aristote, la Terre a toujours existé et ne peut pas être datée. En 1654, James Ussher, archevêque irlandais, avance un âge de la Terre en se basant sur l'âge et la durée de vie des personnages de la Bible. Il trouve que la Terre aurait 5 700 ans. L'âge trouvé par James Ussher est alors érigé en vérité admise, ou dogme.

En 1755, Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, remet en cause cette valeur. Il va être le premier naturaliste à se risquer à déterminer un âge pour la Terre. Il observe en effet des fossiles marins (Ammonites) jusqu'en haut des montagnes.

COURS

Le temps nécessaire à la formation des roches sédimentaires et à la formation des chaînes de montagnes étant très long, l'âge avancé par Ussher ne lui semble pas réaliste. Il teste alors son hypothèse d'un âge plus élevé en mettant en place une expérience se basant sur les connaissances de l'époque. En procédant de cette façon, il pose les bases d'une démarche scientifique en associant observation et expérimentation. C'est donc l'un des premiers savants à essayer de démontrer l'âge de la Terre de manière expérimentale.

Buffon part du principe que la Terre est comme une boule en fusion en son centre et qu'elle se refroidirait en surface. Il procède alors par analogie en assimilant la Terre à une boule de métal homogène. Il chauffe alors à blanc des boulets de canon de différents diamètres et estime quand le boulet chauffé atteint la même température qu'un boulet témoin refroidi. L'estimation se fait par apposition des mains sur les deux boulets jusqu'à ne ressentir aucune différence thermique. Il interprète ses résultats et extrapole ses mesures à la Terre dont le diamètre est connu (12 800 km) depuis le IIIe siècle avant J-C par Eratosthène. En 1778, Buffon annonce un âge de 74 000 ans pour être compris de ses lecteurs alors qu'il avait trouvé 10 Ma. Il avait estimé que ce chiffre était choquant pour l'époque. En effet, l'âge trouvé par James Ussher est difficile à remettre en question du fait de la forte influence de l'Église. Au début du XIXe siècle, les idées changèrent un peu grâce à l'intervention du pape Pie VII, qui reconnut que les jours de la « Bible » correspondaient à des durées indéterminées qui expliquaient l'histoire de l'Homme et non celle de la Terre.

À RETENIR

Dans la pensée Antique, l'Univers est éternel et immuable. Pour Aristote (384-322 avant notre ère), la Terre a toujours existé et n'a pas d'âge. En 1654, les premières estimations de l'âge de la Terre se basaient sur la Bible et on pensait que la Terre avait 5 700 ans. En 1774, les expériences analogiques discutables de Buffon (refroidissement de boulets de canons chauffés à blanc) en accord avec les théories de l'époque, l'amènent à avancer un âge de 74 000 ans. La forte influence de l'Église lui fait minorer son résultat (74 000 ans au lieu de 10 Ma).

Voir exercice 4 page 220.

3 Une controverse entre naturalistes et physiciens

PROBLÉMATIQUE

Quels arguments sont mis en avant par les physiciens et les géologues ?

3.1 Les arguments du physicien lord Kelvin

En 1863, le célèbre physicien britannique lord Kelvin applique les lois mathématiques de la conduction thermique de Joseph Fourier sur le temps de refroidissement de la Terre supposée homogène. Il estime à 3 900 °C la température de la Terre en profondeur et part du principe que la Terre ne fait que perdre de l'énergie par conduction en surface, en accord avec les théories de son temps. Il calcule alors le temps de refroidissement nécessaire pour atteindre le gradient géothermique actuel (température en fonction de la profondeur) qui est aux alentours de 30°C par kilomètre.

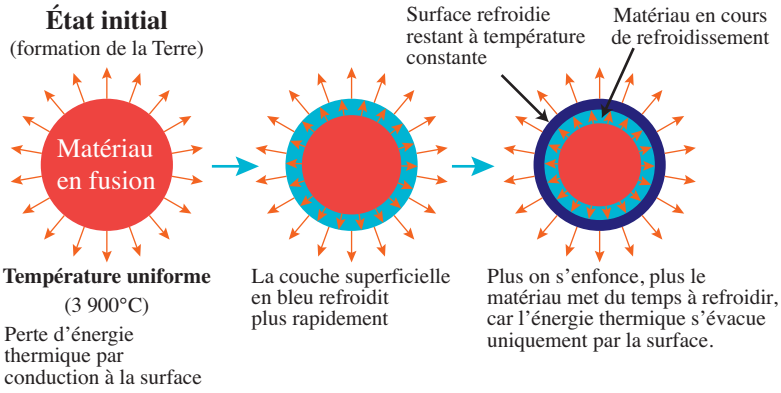


Figure 9.1 – Hypothèse de travail de lord Kelvin

Les incertitudes liées à ses hypothèses l'amènent à proposer en 1862 un âge de la Terre compris entre 20 Ma et 400 Ma, puis en 1881 à affiner cette valeur entre 20 et 40 Ma. Kelvin étant considéré comme le plus grand physicien de son époque, cet âge est alors érigé en dogme scientifique.

3.2 Une autre estimation de l'âge de la Terre par l'approche naturaliste

Au XIX^{e} siècle, Charles Lyell, s'appuie sur l'étude des strates sédimentaires et les nomme en fonction de leur contenu en fossiles. En 1869, Charles Darwin, naturaliste anglais, influencé par sa théorie de l'évolution et les constats de Charles Lyell, avança un âge à la Terre beaucoup plus important que celui annoncé par les physiciens. En effet, les couches sédimentaires ayant mis du temps à se former et les roches contenant des fossiles se ressemblant parfois sur de grandes épaisseurs de roches sédimentaires, il estima que le temps nécessaire à l'évolution du vivant est nécessairement grand. Il pense alors que la Terre a un âge supérieur à 300 millions d'années.

À la fin du XIX^{e} siècle, des géologues tentent aussi d'estimer l'âge de la Terre d'une manière différente avec les taux d'érosion. Les chaînes de montagnes sont

COURS

érodées en surface, les produits de cette érosion (ions, particules de diamètre plus ou moins grand) finissent par sédimenter dans des bassins sédimentaires. Les géologues estiment à partir de divers taux de sédimentation que le taux moyen serait de 1 cm/an. En le considérant constant, pour avoir un affleurement d'un kilomètre de roches sédimentaires, il faudrait 1 Ma. Du fait des affleurements d'épaisseur bien supérieure et des cycles géologiques longs (collision, érosion, sédimentation), ils estimèrent avec les connaissances de l'époque que l'âge de la Terre devait être plutôt aux alentours de 3 Ga à 3,5 Ga.

Face à cette controverse, les membres de la communauté scientifique privilégient la rigueur des calculs de lord Kelvin, le plus grand physicien rigoureux de son époque. En effet, à la défaveur des biologistes et géologues, leurs convictions basées des observations et leurs constructions théoriques sont difficiles à tester.

À RETENIR

Au XIX^{e} siècle, une forte controverse s'installe entre physiciens et naturalistes autour de l'âge de la Terre. En effet, des échanges d'arguments scientifiques en apparence valides, issus de champs disciplinaires différents, conduisent à des résultats contradictoires. Les arguments des naturalistes basés sur l'observation les amènent à envisager un âge de plusieurs centaines de millions voire un âge supérieur à un milliard d'années. La modélisation calculatoire de lord Kelvin, physicien renommé, en accord avec les données et théories de l'époque, lui font plutôt avancer un âge de plusieurs dizaines de millions d'années.

Voir exercices 3 page 220 et 7 page 227.

4 Une révolution marquée par les apports de la radiochronologie

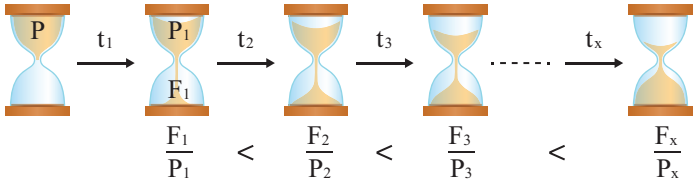
PROBLÉMATIQUE

Comment la radioactivité a-t-elle permis de déterminer un âge absolu de la Terre ?

En 1895, John Perry, ancien assistant de lord Kelvin, avance que la Terre serait animée de mouvements de convection en profondeur sous une fine couche de roche solide en surface. Cette convection induirait une homogénéisation de la température du manteau terrestre. Il reprend les données de lord Kelvin mais apporte la notion de convection au modèle. Ses calculs l'amènent à trouver un âge de 2 Ga.

En 1896, la radioactivité est découverte par Henri Becquerel. On comprend alors que la radioactivité elle est aussi une source d'énergie thermique pour la Terre. La Terre n'est pas une boule de matériau en fusion en son centre qui perd une éner-

gie thermique initiale de collision ; elle en produit aussi par désintégration radioactive. Le modèle de lord Kelvin est alors invalidé du fait de ces nouvelles découvertes. La découverte de la radioactivité et l'amélioration des premiers spectromètres de masse datant du début de XX^{e} siècle amènent les scientifiques à pouvoir désormais donner un âge absolu à la Terre. Cette datation repose sur le principe suivant : des atomes radioactifs instables (ou éléments pères) se désintègrent spontanément en d'autres atomes radiogéniques (ou éléments fils) en émettant des particules de matière et de l'énergie. En 1904, le physicien Ernest Rutherford montre que le rapport de la quantité d'éléments pères sur la quantité d'éléments fils dépend uniquement du temps et de la roche. Ces rapports basés sur les lois de décroissance radioactive constituent donc une horloge.



Réaction de désintégration :
un élément père Po se transforme en un élément fils F. Ainsi au cours du temps, la quantité d'éléments P diminue alors que la quantité d'éléments F augmente.

Figure 9.2 – Décroissance radioactive

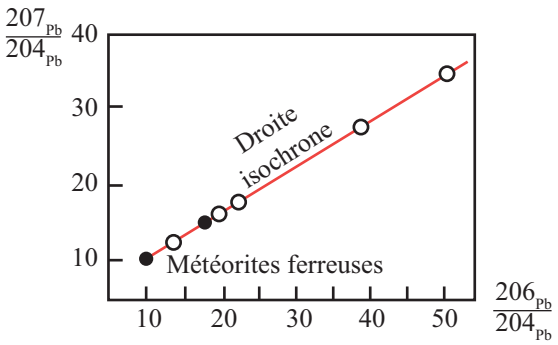
Cependant, les premières mesures sur différentes roches ont donné des âges assez différents. En 1950 le géochimiste Clair Patterson comprend que les plus vieilles roches accessibles à la surface de la Terre ne peuvent fournir qu'un âge pour la croûte et qu'il faudrait dater des éléments ayant la même composition que la Terre au moment de sa formation, des éléments non remaniés par les processus géologiques, formés en même temps que la Terre : les météorites.

Patterson applique les nouvelles méthodes de la radiochronologie donc des méthodes de datation absolue basées sur la désintégration d'éléments radioactifs aux météorites. L'uranium ^{235}U et l'uranium ^{238}U radioactifs se désintègrent en plusieurs étapes et donnent au final du plomb ^{205}Pb et du plomb ^{206}Pb, radiogéniques. Il existe un isotope stable ^{204}Pb. Grâce à des spectromètres de masse, on peut mesurer les rapports isotopiques ^{207}Pb/^{204}Pb et les rapports ^{206}Pb/^{204}Pb. Clair Patterson émit l'hypothèse que si les rapports isotopiques mesurés sur différentes météorites forment une droite (dite isochrone), c'est à dire une fonction affine ($y = ax + b$). Le coefficient directeur de la droite permet de calculer l'âge commun des météorites. En 1953, Patterson annonce ainsi un âge de 4,55 Ga (+/- 70 Ma).

Le graphique suivant présente les rapports isotopiques mettant en évidence les âges des roches étudiées (chaque point représente une roche différente dont la

COURS

plupart sont des météorites).



Retrouvez les méthodes de datation de l'âge de la Terre en vidéo avec live!

En 2012, on a déterminé que l'âge de la Terre serait de 4,57 Ga (+/- 20 Ma). Cette valeur fait désormais consensus.

À RETENIR

Grâce à la datation absolue rendue possible par la découverte de la radioactivité au XXe siècle, on a pu déterminer en 2012 que l'âge de la Terre est de 4,57 Ga. Cette valeur fait aujourd'hui consensus car elle est compatible avec tous les arguments qui lui sont confrontés.

Voir exercices 2 page 219, 5 page 222 et 6 page 225.

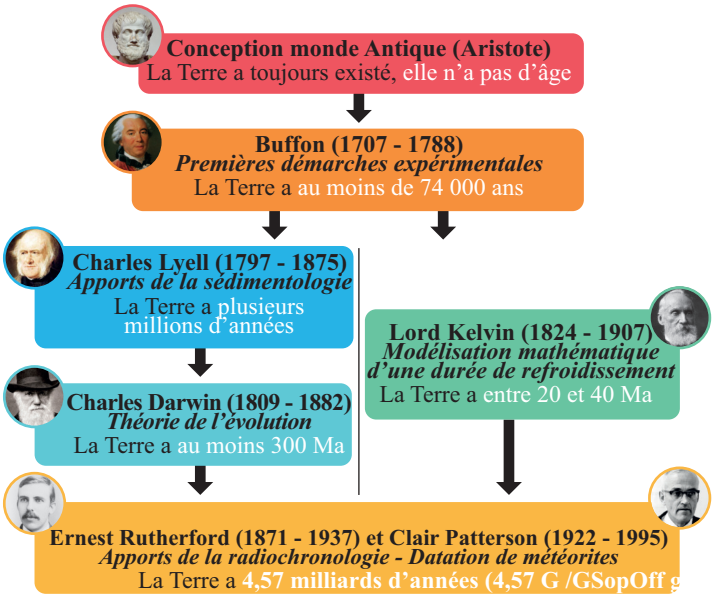


Figure 9.3 – Les principales contributions de la détermination de l'âge de la Terre

1 QCM Vérification des connaissances

2 min Corrigé p. 229

Choisissez la bonne réponse pour chaque série de propositions.

1 L'âge de la Terre :

[a] est connu depuis Aristote ;

[b] est très différent de celui des météorites ;

[c] est d'environ 4,5 millions d'années ;

[d] est d'environ 4,5 milliards d'années.

2 La radioactivité :

[a] a été découverte par Patterson ;

[b] a permis de déterminer l'âge de la Terre de façon relative ;

[c] n'est présente que dans les roches continentales ;

[d] est une source d'énergie thermique pour la Terre.

3 La détermination de l'âge de la Terre du temps de Kelvin et Darwin montre :

[a] qu'il y avait consensus ;

[b] que les physiciens avaient une estimation proche de la réalité à cette époque ;

[c] qu'il y avait controverse.

4 L'âge absolu de la Terre :

[a] est en accord avec les textes bibliques ;

[b] est déterminé par des études sédimentaires ;

[c] est proche de ce que Kelvin proposait ;

[d] a été déterminé grâce à la désintégration radioactive de certains atomes.

5 Certaines météorites :

[a] ont permis de comprendre quand s'est formé le système solaire ;

[b] indiquent que la Terre est plus âgée que le Soleil ;

[c] sont à l'origine de la datation relative de la Terre ;

[d] proviennent de Vénus formée bien avant la Terre car plus proche du Soleil.

2 Qui pense quoi ?

★

15 min Corrigé p. 229

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

Sous la forme d'un tableau, présenter les méthodes utilisées pour estimer l'âge de la Terre et leur estimation, des cinq contributeurs suivants : Buffon, Darwin, lord Kelvin, Patterson et Ussher.

3 Le Grand Canyon

★ — 15 min — Corrigé p. 230

Lycée Guynemer, Compiègne

Le Grand Canyon aux USA peut atteindre 1 300 m de profondeur. On y trouve des roches sédimentaires formées par dépôt de sédiments sous l'eau. On estime que les sédiments se déposent à un rythme de 1 mm à 1 cm par an.

Une fois les roches émergées, elles sont soumises à l'érosion. On estime que le taux d'érosion varie entre 2 et 20 cm par millier d'années.

1. D'après les données de l'exercice, combien de temps est nécessaire pour former les 1 300 m de roches sédimentaires du Grand Canyon ?
2. D'après les données de l'exercice, combien de temps est nécessaire pour creuser le Grand Canyon et ses 1 300 m de profondeur ?
3. Donner le nom des scientifiques du XIXème siècle qui ont étudié les sédiments et fossiles pour estimer l'âge de la Terre. Quel âge ont-ils trouvé ?
4. Pourquoi cet âge n'a-t-il pas été retenu ?
5. Quelle application en géologie utilise-t-on encore de leurs recherches ?

4 L'expérimentation de Buffon

★★ — 30 min — Corrigé p. 231

Lycée La Bruyère, Versailles

Document 1 : extrait d'un mémoire rédigé par Buffon

« [...] *J'ai fait faire dix boulets de fer forgé et battu :*

Le premier d'un demi-pouce de diamètre. Le second d'un pouce. Le troisième d'un pouce et demi. Le quatrième de deux pouces. Le cinquième de deux pouces et demi. Le sixième de trois pouces. Le septième de trois pouces et demi. Le huitième de quatre pouces. Le neuvième de quatre pouces et demi. Le dixième de cinq pouces.

Ce fer venait de la forge de Chameçon près de Châtillon-sur-Seine, et comme tous les boulets ont été faits du fer de cette même forge, leurs poids se sont trouvés à très-peu près proportionnels aux volumes. [...]

J'ai cherché à saisir deux instants dans le refroidissement, le premier où les boulets cessaient de brûler, c'est-à-dire le moment où on pouvait les toucher et les tenir avec la main, pendant une seconde, sans se brûler ; le second temps de ce refroidissement était celui où les boulets se sont trouvés refroidis jusqu'au point de la température actuelle, c'est-à-dire, à 10 degrés au-dessus de la congélation. Et pour connaître le moment de ce refroidissement jusqu'à la température actuelle, on s'est servi d'autres boulets de comparaison de même matière et de mêmes diamètres qui n'avaient pas été chauffés, et que l'on touchait en même temps que ceux qui avaient été chauffés. Par

cet attouchement immédiat et simultané de la main ou des deux mains sur les deux boulets, on pouvait juger assez bien du moment où ces boulets étaient également froids ; cette manière simple est non seulement plus aisée que le thermomètre qu'il eût été difficile d'appliquer ici, mais elle est encore plus précise, parce qu'il ne s'agit que de juger de l'égalité et non pas de la proportion de la chaleur, et que nos sens sont meilleurs juges que les instruments de tout ce qui est absolument égal ou parfaitement semblable. Au reste, il est plus aisé de reconnaître l'instant où les boulets cessent de brûler que celui où ils se sont refroidis à la température actuelle, parce qu'une sensation vive est toujours plus précise qu'une sensation tempérée, attendu que la première nous affecte d'une manière plus forte. [...] »

G.-L. LECLERC DE BUFFON, *Expériences sur le progrès de la chaleur dans les corps*. Mémoire rédigé en 1774.

Document 2 : Tableau présentant les résultats de l'expérimentation de Buffon

Diamètre du boulet [1] (en cm)	2,54	5,04	7,62	10,16	12,7
Temps de refroidissement pour tenir dans la main (en min)	35,5	80	127	182	232
Temps de refroidissement au point de la température actuelle (en min)	93	196	308	415	522

Document 3 :

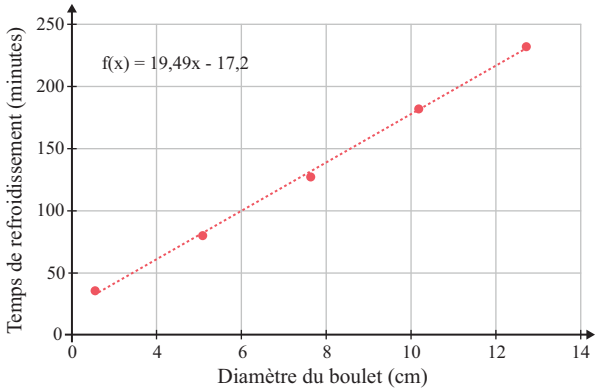
On trace alors les courbes temps de refroidissement en fonction du diamètre du boulet.

Voir graphiques page suivante.

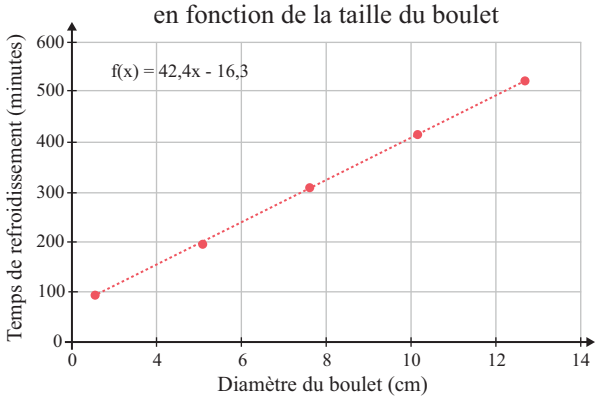
1. La valeur était en pouces dans le rapport de Buffon.

INTERROS

Temps du premier refroidissement
en fonction de la taille du boulet



Temps du deuxième refroidissement
en fonction de la taille du boulet



1. Le temps de refroidissement des boulets est-il proportionnel au diamètre du boulet ? Justifiez votre réponse.
2. Buffon connaissait le diamètre de la Terre : 12 800 km. Calculer l'âge de la Terre trouvé par cette expérimentation.
3. Quelle raison a fait que Buffon n'a annoncé que 74 000 ans pour l'âge de la Terre, et non la valeur réellement trouvée ?
4. Reprenez l'expérience de Buffon. Améliorez cette expérience avec vos connaissances.

5 Datations dans la grotte de Chauvet ★★

50 min Corrigé p. 232

D'après annales de bac S, SVT, Amérique du Nord 2008 et sujet 0 E3C 2020

Découvertes en Ardèche, en 1994, la grotte de Chauvet est célèbre pour ses peintures rupestres réalisées par des êtres humains préhistoriques. Ces pein-

tures comptent parmi les plus anciennes connues. Leur âge a été estimé par la méthode de datation au carbone 14.

Document 1 : datation par le ^{14}C

L'isotope ^{14}C de l'élément carbone se désintègre en élément azote et se régénère régulièrement en haute atmosphère à partir de l'azote de l'air : il se retrouve donc en proportion constante et connue dans tous les milieux et tous les êtres vivants. Lorsqu'un animal ou une plante meurt, son métabolisme cesse et son carbone n'est plus renouvelé. En raison de la désintégration radioactive, le rapport du nombre d'atomes ^{14}C résiduel (P) sur celle au moment de la mort (Po) décroît au cours du temps.

1 Écrire la réaction de désintégration du ^{14}C.

2 Comment connaît-on Po ? Comment connaît-on P ?

3 Cocher la bonne réponse dans chaque série de proposition :

(A) La date de désintégration d'un noyau individuel de ^{14}C dont on connaît la date de création (prise comme origine) est :

- [a] aléatoire ;
- [b] égale à 5 730 ans ;
- [c] prévisible ;
- [d] comprise avec certitue entre 100 et 10 000 ans.

(B) La durée nécessaire à la désintégration radioactive de la moitié des noyaux radioactifs d'un échantillon dépend :

- [a] du nombre initial de noyaux ;
- [b] de la nature chimique du noyau ;
- [c] du volume de l'échantillon ;
- [d] de la température.

4 Pourquoi ne peut-on faire les mesures que sur les restes d'êtres vivants ?

Document 2 : les objets géologiques de la grotte Chauvet



Les peintures préhistoriques sont réalisées avec des fragments de charbon de bois et des pigments minéraux. Les éléments dissous dans l'eau circulent

dans la grotte et cristallisent sous forme d'un voile de calcite recouvrant les parois et certaines peintures. Ce voile de calcite est lui-même recouvert d'un dépôt de charbon résultant d'un mouchage de torche (frottement de torche sur la paroi pour retirer la partie carbonisée qui asphyxie la flamme).

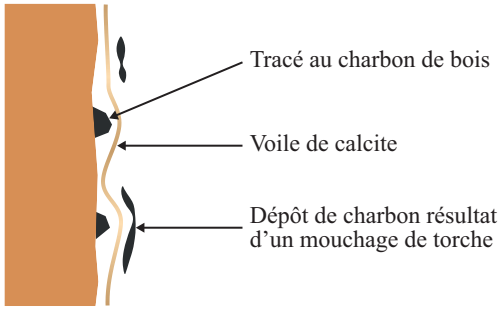


Figure 9.4 – Schéma des recouvrements vus en coupe

5 Justifier qu'on ait utilisé des fragements de charbon pour dater les peintures au ^{14}C.

Document 3 : les mesures faites dans la grotte de Chauvet.

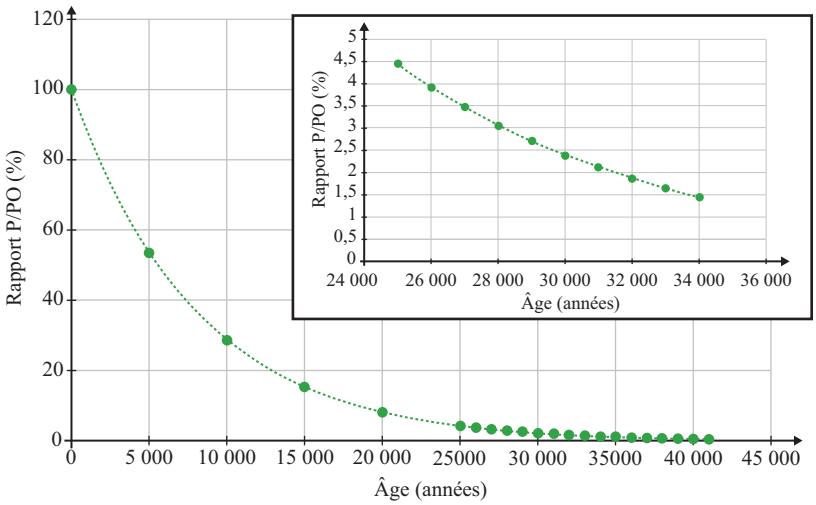
Deux ensembles de mesures ont été réalisés dans la grotte de Chauvet.

- le premier réalisé sur des fragments de charbon de bois prélevés sur les peintures fournit des valeurs P/Po comprises entre 1,64 % et 2,70 %. Des critiques ont été émises sur la validité de leur datation. L'une d'elles explique que l'on ne date pas directement la peinture mais les matières utilisées. Le charbon de bois utilisé pour peindre a pu être fabriqué pour cet usage ou prélevé dans un foyer bien plus ancien.
- le second réalisé sur des fragments de charbon de bois prélevés sur les mouchages de torche fournit des valeurs comprises entre 3,47 % et 4,37 %. Ces torches étaient fabriquées à partir de branches prélevées sur l'arbre au fur et à mesure des besoins.

6 Expliquer pourquoi il est difficile de dater précisément la peinture de cette grotte de Chauvet.

Voir document 4 page suivante.

Document 4 : Courbes à étudier.



7 Déterminer graphiquement la période de demi-vie du ^{14}C après l'avoir définie.

8 Déterminer les périodes d'occupation de la grotte par les humains, seuls êtres vivants à pratiquer l'art et maîtriser le feu.

6 La méthode de datation de Patterson ★★★

30 min — Corrigé p. 234

Lycée « en forêt », Montargis

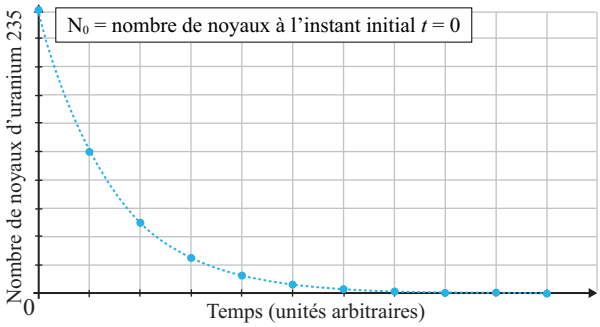
En 1953, Clair Cameron Patterson est en post-doctorat à l'Université de Chicago sous la direction du géochimiste Harrison Brown qui travaillait sur les météorites pour mieux connaître l'origine du système solaire et la constitution des planètes. Patterson procède à l'analyse de la composition isotopique du plomb contenu en traces dans les météorites et montre que la Terre et les météorites se sont formées à la même époque, il y a 4,55 Ga (+/- 70 Ma). En se référant au corpus de connaissances acquis depuis, l'étude de Patterson est considérée comme ayant fourni la première estimation correcte de l'âge de la formation du Système solaire et de la Terre. Cet âge sera confirmé par d'autres méthodes isotopiques (potassium/argon et rubidium/strontium).

Utilisation de la disparition de l'uranium 235 (^{235}U) dans l'échantillon de roche.

On considère que lors de la formation de la Terre, de l'uranium naturel était présent, en particulier l'isotope radioactif ^{235}U. L'examen de roches montre qu'aujourd'hui, il reste environ 1 % de l'uranium 235 présent lors de la formation de la Terre.

INTERROS

Le graphique ci-dessous représente le nombre de noyaux d'uranium 235 restants en fonction du temps. On note N_0 le nombre de noyaux à l'instant initial $t = 0$.



1 Sur ce graphique, repérer la demi-vie $t_{1/2}$ de l'uranium 235. Faire apparaître les traits de construction.

2 Au bout de combien de demi-vie, l'uranium 235 n'est présent qu'à 1 % ? Donner une fourchette.

3 Sachant que la demi-vie $t_{1/2}$ de l'uranium 235 est de 0,704 milliard d'années, proposer une estimation de l'âge de la Terre.

Utilisation de la droite isochrone $^{207}Pb/^{204}Pb$ en fonction de $^{206}Pb/^{204}Pb$.

Clair Patterson a utilisé une méthode aujourd'hui très répandue en radiochronologie, la méthode plomb-plomb. Elle repose sur la détermination de la composition isotopique du plomb, dont deux isotopes, ^{206}Pb et ^{207}Pb proviennent pour partie de la désintégration naturelle de deux isotopes radioactifs à longue vie de l'uranium : ^{235}U et ^{238}U. Par désintégrations successives, ^{235}U et ^{238}U produisent au final respectivement ^{207}Pb et ^{206}Pb. En termes de bilan de ces suites de désintégration, tout se passe comme s'il ne se produisait qu'une seule réaction directe de désintégration pour chaque isotope, car les étapes intermédiaires ont des demi-vies très courtes :

$^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + 6\,^{0}_{-1}\overline{e} + 8\,^{4}_{2}\text{He}$

$^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{207}_{82}\text{Pb} + 4\,^{0}_{-1}\overline{e} + 7\,^{4}_{2}\text{He}$

avec $t_{1/2}$ ^{238}U = 4,47 Ga et $t_{1/2}$ ^{235}U = 0,704 Ga.

La quantité de Pb mesurée dans un échantillon est égale à la somme du plomb déjà présent au moment de la fermeture du système et celle issue de la désintégration de l'uranium radioactif.

Dans plusieurs échantillons, on note les rapports ^{207}Pb/^{204}Pb et ^{206}Pb/^{204}Pb. On place les points des mesures sur un graphique. Si on peut tracer une droite à partir de ces points, c'est que les éléments ce sont formés en même temps. À partir du coefficient directeur on peut obtenir l'âge des échantillons.

Voici les mesures faites dans cinq échantillons de météorites étudiées par Patterson :

Numéro de l'échantillon	1	2	3	4	5	Sédiments marins
$^{206}Pb/^{204}Pb$	50,28	9,46	19,27	19,48	9,55	19
$^{207}Pb/^{204}Pb$	34,86	10,34	15,95	15,76	10,38	15,8

4 Justifier qu'on utilise ces éléments pour une datation de la Terre par radiochronologie.

5 Tracer la droite $^{207}Pb/^{204}Pb$ en fonction de $^{206}Pb/^{204}Pb$ pour les cinq météorites.

6 Placer le point des sédiments marins. Les sédiments marins sont-ils alignés avec cette droite ? Quelle conclusion en tirer ?

7 Quel est le coefficient directeur de la droite isochrone tracée ?

8 À partir de ce coefficient directeur, on peut obtenir l'âge de la Terre. D'après vos connaissances, quelle valeur approximative devrait-on trouver ?

7 La salinité des océans

★★★ 40 min Corrigé p. 235

Lycée Claude Bernard, Paris

Le physicien irlandais John Joly (1857-1933) est célèbre pour avoir proposé une méthode de datation de la Terre à partir de la salinité des océans.

Document 1 : principe de la méthode de datation.

Il a exposé le principe de sa méthode le 7 mai 1899, à l'Académie Royale de Dublin. Il pensait, qu'au départ, l'océan n'était pas salé ; le sel qu'il contient est issu de l'érosion des roches continentales et a été apporté par les rivières. En mesurant la salinité actuelle de l'océan, on peut donc en déduire le temps écoulé depuis sa formation.

Document 2 : définition de la salinité.

La salinité est la masse de sels (composés ioniques) dissous dans 1 L d'eau. Elle s'exprime en g par kg d'eau. L'eau de mer contient en moyenne 35 g de sels par kg d'eau de mer. Le chlorure de sodium, appelé couramment « sel », est un composé ionique responsable à 77,8 % de la salinité de l'eau de mer. Les autres ions responsables de la salinité sont essentiellement les ions sulfate SO_4^{2-}, hydrogénocarbonate (ou bicarbonate) HCO_3^-, fluorure F^-, magnésium Mg^{2+}, calcium Ca^{2+} et potassium K^+.

1 Donner la formule chimique du chlorure de sodium et la formule des ions qui le constituent.

INTERROS

2 En utilisant vos connaissances sur le cycle de l'eau, expliquer comment l'eau douce des rivières peut saler les océans.

John Joly a fait l'hypothèse que le sodium des océans ne provenait que des rivières. Il a estimé qu'elles apportaient $1{,}43.10^{11}$ kg de sodium chaque année aux océans.

3 La masse des océans est de $1{,}33.10^{21}$ kg.
On donne $M(\text{Na}) = 23{,}0$ g.mol^{-1} et $M(\text{Cl}) = 35{,}5$ g.mol^{-1}. Calculer la masse de sodium contenue dans les océans en utilisant toutes les données utiles.

4 En appliquant l'hypothèse de John Joly, calculer l'âge des océans.

On va supposer que l'âge des océans est l'âge minimal de la Terre.

5 John Perry en 1895, avait repris les calculs de lord Kelvin en y ajoutant les mouvements de convection. Quel âge avait alors trouvé Perry ? Le comparer à celui de John Joly.

6 Comparer l'âge de la Terre estimé par des mesures de radiochronologie et le résultat obtenu par la méthode de Joly. Commenter et proposer une explication à cet écart.

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 219

1. Réponse d.
2. Réponse d.
3. Réponse c.
4. Réponse d.
5. Réponse a.

2 Qui pense quoi ?

Enoncé p. 219

Lycée Jean-Pierre Vernant, Sèvres

	Epoque / année	Age avancé	Méthode	Loi/théorie utilisée
Ussher	1654	5 700 ans (-4004 avant J.-C)	Basé sur l'âge et la durée de vie des personnages bibliques	Bible
Buffon	1778	74 000 (à 10 Ma)	Modèle analogique : temps de refroidissement de boulets de canons métalliques. Extrapolation à la Terre dont on connaît le rayon	Nébuleuse protosolaire expliquant la formation du système solaire
Darwin	1869	> 300 Ma	Temps d'érosion et évolution des espèces	Principe d'actualisme et théorie de l'évolution
lord Kelvin	1862	20 Ma à 100 Ma	Temps de refroidissement de la Terre estimé en lien avec le gradient géothermique mesuré	Loi de Fourier sur la conduction de la chaleur
Patterson	1953	4,5 Ga	Radiochronologie sur des météorites	Loi de décroissance radioactive

3 Le Grand Canyon

Enoncé p. 220

Lycée Guynemer, Compiègne

1 Le dépôt de sédiment se produit à un rythme allant de 1 mm/an à 1 cm/an.

$v = \dfrac{d}{t}$. Donc pour connaître le temps de sédimentation, il faut faire le calcul suivant : $t = \dfrac{v}{d}$.

$d = 1\,300$ m, soit $1\,300\,000$ mm.

$v = 1$ mm/an à 10 mm/an.

Donc :

$$\frac{1\,300\,000}{10} < \text{durée de sédimentation} < \frac{1\,300\,000}{1}$$
$$\iff 130\,000 \text{ ans} < \text{durée de sédimentation} < 1\,300\,000 \text{ ans.}$$

La sédimentation des roches du Grand Canyon a donc duré entre 130 000 ans et 1,3 millions d'années.

2 L'érosion des roches sédimentaires se produit à un rythme allant de 2 cm/1 000 ans à 20 cm/1 000 ans.

$v = \dfrac{d}{t}$. Donc pour connaître le temps d'érosion, il faut faire le calcul suivant : $t = \dfrac{v}{d}$.

$v = 2$ cm/1 000 ans, soit 2.10^{-3} cm/an, à 20 cm/1 000 ans, soit 2.10^{-2} cm/an.

Donc :

$$\frac{130\,000}{2.10^{-2}} < \text{durée de l'érosion} < \frac{130\,000}{2.10^{-3}}$$
$$\iff 6\,500\,000 \text{ ans} < \text{durée de l'érosion} < 65\,000\,000 \text{ ans.}$$

L'érosion des roches du Grand Canyon a donc nécessité entre 6,5 millions d'années et 65 millions d'années.

3 Charles Lyell étudie les strates sédimentaires et les fossiles qu'elles contiennent. Charles Darwin en utilisant ses données et celles de Charles Lyell, estime qu'il a fallu au moins 300 Ma pour que l'évolution des espèces et le dépôt des sédiments puissent se faire.

Puis les géologues estiment le taux d'érosion et de sédimentation. Ils calculent alors que la Terre a plutôt 3 à 3,5 Ga.

4 Les âges avancés par les naturalistes et les géologues sont basés sur des observations et des estimations de taux de sédimentation et d'érosion. Ces estimations ne sont pas vérifiables. À l'inverse, les calculs de lord Kelvin sont rigoureux, en accord avec les données et théories de

l'époque. Il trouve un âge de 400 Ma qu'il réduit à 40 Ma. La communauté scientifique se rangera derrière lord Kelvin, physicien renommé.

5 Grâce aux observations de Lyell et Darwin, on a pu établir un découpage très précis des temps géologiques. On les utilise pour la datation relative des couches sédimentaires.

4 L'expérimentation de Buffon

Enoncé p. 220

Lycée La Bruyère, Versailles

1 Le temps de refroidissement n'est pas proportionnel à la taille du boulet car la droite ne passe pas par l'origine.

2 Il suffit d'appliquer la formule de l'équation de droite donnée :

$$y = 42{,}402x - 16{,}3.$$

Avant d'appliquer la formule, il faut convertir le diamètre de la Terre, 12 800 km, en cm : 12 800 km $= 1{,}28.10^9$ cm. Donc a on a :

Âge de la Terre = temps de refroidissement d'un boulet de $1{,}28.10^9$ cm

$$= 42{,}402 \times 1{,}28.10^9 - 16{,}3 = 5{,}43.10^{10} \text{ minutes},$$

soit 103 262 ans.

3 En 1778, Buffon a estimé qu'il serait choquant d'annoncer un âge de la Terre aussi grand. Par plusieurs calculs, il avait trouvé 10 Ma. Du fait de la forte influence de l'église, même cet âge de 74 000 ans n'a pas été retenu. L'estimation de 7 500 ans, calculée à partir de l'âge et la durée de vie des personnages bibliques de Ussher ne pouvait pas être remise en cause.

4 En 1755, Buffon pensait que la Terre était une boule en fusion en son centre et qu'elle se refroidissait en surface.

Critique : en fait, seul le noyau externe est en fusion. De plus, la Terre n'est pas entièrement métallique, elle a un manteau silicaté qui représente la plus grande partie de son volume. On pourrait faire des boules non homogènes, en respectant la composition et l'épaisseur relative de chaque couche terrestre : croûte, manteau, noyau. Le fer du boulet ne perd pas forcément son énergie thermique de la même façon que des roches silicatées.

L'énergie thermique perdue en surface serait l'énergie thermique résiduelle de collision de planétésimaux.

Critique : en fait, la plus grosse partie est de l'énergie thermique libérée par la désintégration nucléaire. Il faudrait trouver un moyen de production d'énergie thermique en continu depuis le centre de la boule.

Il avait chauffé à blanc des boulets de canon de différents diamètres.

Critique : chauffer à blanc ne veut pas dire que toute la boule est en fusion de manière à représenter les tout débuts de la Terre. Il aurait de

plus fallu chauffer tous les boulets à la même température et s'en assurer avec des thermomètres.

Buffon estime le temps nécessaire à son boulet chauffé pour revenir à la température du boulet témoin refroidi par apposition des mains sur les deux boulets jusqu'à ne ressentir aucune différence thermique entre les deux boulets.

Critique : L'estimation par les mains n'est pas très fiable. Il aurait fallu des thermomètres pour voir qu'ils ont bien atteint la même température que le boulet témoin.

5 Datations dans la grotte de Chauvet

Enoncé p. 222

D'après annales de bac S, SVT, Amérique du Nord 2008 et sujet 0 E3C 2020

1 Le carbone 14 possède un excès de neutrons, et se désintègre en azote 14. La réaction de désintégration s'écrit :

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\beta^{-} + {}^{0}_{0}\overline{\nu}.$$

2 La quantité de ^{14}C initiale dans l'échantillon et noté P_0 est constante et connue dans tous les milieux et êtres vivants.

La quantité de ^{14}C résiduelle est mesurée dans l'échantillon.

Le rapport P/P_0 donnera le temps qui s'est écoulé depuis la fermeture du système, c'est-à-dire depuis la mort de l'être vivant ; en d'autres termes son âge.

3 Il fallait cocher A **a** (en effet, l'atome qui se désintègre est l'un de ceux qui se trouve dans la masse de départ) et B **b** (en effet, le temps de demi-vie dépend de la nature du noyau et pas de la quantité initiale d'atomes radioactifs.).

4 La matière organique est de la matière carbonée, elle contient du carbone. Le ^{14}C est autant utilisé que le ^{12}C dans le métabolisme des êtres vivants. Quand l'organisme meurt, il cesse les échanges avec l'air, le système est fermé. On peut donc utiliser la désintégration du ^{14}C pour dater l'âge de la fermeture du système.

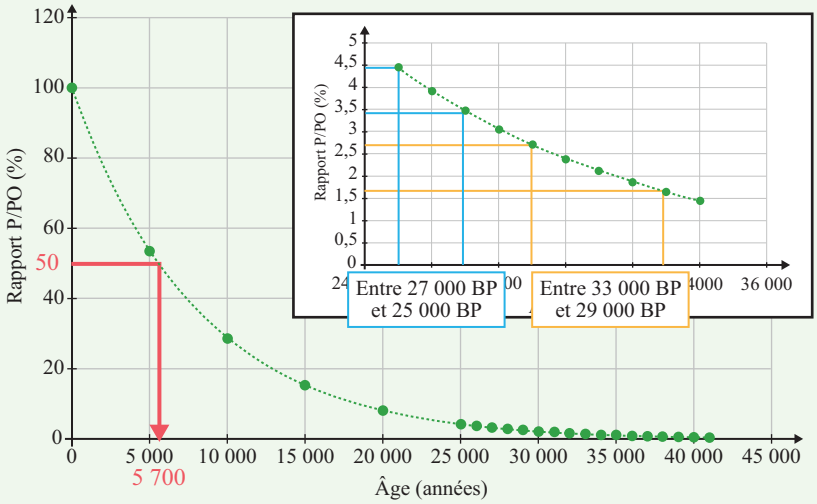
5 Le charbon est un morceau de bois mort qui a été brûlé dans un foyer. C'est donc de la matière organique contenant du ^{14}C.

6 Pour le deuxième ensemble de mesures, on a utilisé du charbon prélevé sur les mouchages de torche. Ce charbon a été prélevé sur l'arbre pour faire la torche, puis le mouchage réalisé dans la foulée. Le mouchage a donc l'âge de la peinture. On constate sur l'illustration des recouvrements en coupe, que les traits de charbon de la peinture sont recouverts de calcite et que le mouchage a été fait sur le voile de calcite. Donc le mouchage est plus récent que la peinture.

Mais les traits de charbon auraient pu être faits avec des morceaux récupérés dans un foyer abandonné des milliers d'années auparavant.

La datation de la peinture n'est donc pas précise, car on ne connaît que l'âge du charbon ayant fait la peinture avec le premier ensemble de mesures (charbon peut être plus vieux que la peinture), et on sait que le deuxième ensemble de mesures nous donne un âge plus récent que la peinture (dépôt de calcite entre peinture et mouchage).

7 Le temps de demi-vie est d'environ 5 700 ans (5 730).



8 Voir illustration de la question 7.

Les humains sont les seuls êtres vivants à maîtriser le feu. Les charbons de bois présents dans la grotte nous indiquent au moins deux moments d'occupation de la grotte : entre 33 000 BP et 29 000 BP puis, plus récemment, entre 27 000 BP et 25 000 BP.

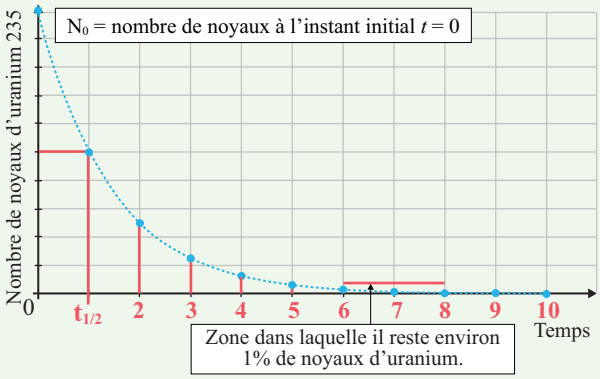
CORRIGÉS

6 La méthode de datation de Patterson

Enoncé p. 225

Lycée « en forêt », Montargis

1 Le graphique suivant montre le temps de demi-vie $t_{1/2}$ de l'uranium 235.



2 L'uranium n'est présent qu'à 1 % dans la fourchette 6 à 8 temps de demi-vie.

3 Donc on a comme âge de la Terre :

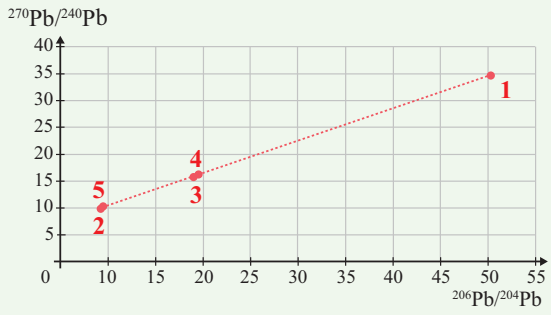
$$0{,}704 \times 6 < \text{âge de la Terre} < 0{,}704 \times 8$$

$$4{,}224 \text{ Ga} < \text{âge de la Terre} < 5{,}632 \text{ Ga}.$$

4 Pour faire de la radiochronologie, on choisit l'élément en fonction de son temps de demi-vie. La durée à mesurer doit être comprise entre un centième et dix fois la demi-vie de l'isotope sinon tous les noyaux seront désintégrés et toute mesure sera impossible. De plus, cet isotope ne doit pas être lui-même radiogénique (c'est-à dire issu d'une désintégration radioactive).

$t_{1/2}\ ^{238}\text{U} = 4{,}47$ Ga et $t_{1/2}\ ^{235}\text{U} = 0{,}704$ Ga. Patterson savait que la Terre avait au moins 2 Ga d'après les travaux de John Perry. Comme l'uranium 235 et l'uranium 238 ne sont pas radiogéniques, on peut utiliser cette méthode pour dater l'âge de la Terre.

5 D'après les valeurs du tableau fourni à la question 3), la droite demandée (droite isochrone) est la suivante :



6 Le point des valeurs des sédiments marins fait partie de la droite construite avec les valeurs des météorites. On peut donc en conclure que la Terre et les météorites se sont formés en même temps à partir du même matériau.

7 Le coefficient directeur est : 0,602 7.

MÉTHODE

Pour calculer un coefficient directeur, on utilise la forumle :

$$\frac{y_A - y_B}{x_A - x_B}.$$

Par exemple :

$$\frac{15{,}95 - 10{,}34}{19{,}27 - 9{,}46} = 0{,}571\,9.$$

8 Patterson avait trouvé un âge de 4,55 Ga.

7 La salinité des océans

Enoncé p. 227

Lycée Claude Bernard, Paris

1 Le chlorure de sodium a pour formule NaCl. Il est composé d'ion chlorure Cl^- et d'ion sodium Na^+.

2 L'eau qui s'évapore des océans est de l'eau douce. Elle précipite sous forme de pluies et de neige au-dessus des continents. Les pluies sont donc peu chargées en minéraux. Ces eaux ruissellent et lessivent les sols. Tout le long de son trajet, l'eau se charge en ions dissous qu'elle apporte jusqu'à l'océan.

3 La salinité des océans est de 35g par kg d'eau. Le chlorure de sodium est responsable de 77,8% de la salinité des océans. L'océan a une masse de $1{,}33.10^{21}$ kg. Donc on a :

$$\begin{aligned} m(\text{NaCl}) &= \%\text{NaCl dans salinité} \times \text{salinité} \times \text{masse des océans} \\ &= \frac{77{,}8}{100} \times 0{,}035 \times 1{,}33.10^{21} \\ &= 3{,}6.10^{19}\ \text{kg}. \end{aligned}$$

La masse molaire du chlorure de sodium est la somme des masses molaires des deux ions :

$$M(\text{NaCl}) = M(Na^+) + M(Cl^-) = 23{,}0 + 35{,}5 = 58{,}5\ \text{g.mol}^{-1}.$$

La masse molaire du Na est 23,0 g.mol^{-1}. Donc le pourcentage en masse de Na dans une mole de chlorure de sodium est :

$$\%\text{Na} = \frac{23{,}0}{58{,}5} \times 100 = 39{,}3\%.$$

La masse de sodium dans les océans représente seulement 39,3 % de la masse de NaCl dans les océans. Donc on a :

$$m(\text{Na}) = \frac{39{,}3}{100} \times m(\text{NaCl}) = 0{,}393 \times 3{,}6.10^{19} = 1{,}42.10^{19}.$$

Donc les océans contiennent $1{,}42.10^{19}$ kg de Na.

4 John Joly a fait l'hypothèse que le sodium des océans ne provenait que des rivières. Il a estimé qu'elles apportaient $1{,}43.10^{11}$ kg de sodium chaque année aux océans.

Construisons un tableau de proportionnalité :

Paramètres	Durée en années	Masse de Na en kg
Estimation	1	$1{,}43.10^{11}$
Mesure	t	$1{,}42.10^{19}$

$$t = \frac{1{,}42.10^{19} \times 1}{1{,}43.10^{11}} = 9{,}93.10^{7} \text{ années.}$$

soit environ 100 Ma.

5 John Perry avait trouvé un âge de 2 Ga c'est-à-dire 20 fois plus grand que celui de John Joly.

6 Actuellement, on estime que l'âge de la Terre est de 4,57 Ga, c'est-à-dire 45 fois plus que la valeur trouvée pas John Joly. Donc la salinité est plus faible qu'elle ne devrait l'être. Peut-être que les ions sodium apportés par les rivières ne restent pas dissous et précipitent au fond de l'océan.

Chapitre 10

La Terre dans l'Univers

Plan du chapitre

1. Introduction
2. D'une conception géocentrique à une conception héliocentrique
3. Notre satellite naturel : La Lune

1 Introduction

Depuis la Préhistoire, l'Homme observe le monde qui l'entoure et cherche à le représenter en concevant la place de la Terre dans le cosmos. Mais il faudra attendre le XVII^e siècle pour comprendre les interactions entre chacun des astres de l'Univers et ainsi déterminer la place de la Terre par rapport du Soleil.

PROBLÉMATIQUE

Comment s'est construite la représentation actuelle de l'Univers ?

2 D'une conception géocentrique à une conception héliocentrique

PROBLÉMATIQUE

Comment est-on passé d'une conception géocentrique à une conception héliocentrique ?

ÉTYMOLOGIE

- *Géocentrisme* vient du préfixe grec « géo- », Terre, et du latin « centrum », centre. Conception du monde plaçant la Terre au centre de l'Univers.
- *Héliocentrisme* vient du préfixe grec « hélio- », Soleil, et du latin « centrum », centre. Conception du monde plaçant le Soleil au centre de l'Univers.

En 150, Ptolémée rassemble tous les travaux mathématiques de la Grèce antique, notamment la vision d'Aristote. À cette époque, le géocentrisme est la représentation admise. Il élabore donc une représentation plaçant la Terre sphérique au

COURS

centre de l'Univers. Pour expliquer les trajectoires rétrogrades des planètes (retour en arrière), il élabore une représentation de cercles entrecroisés, les épicycles.

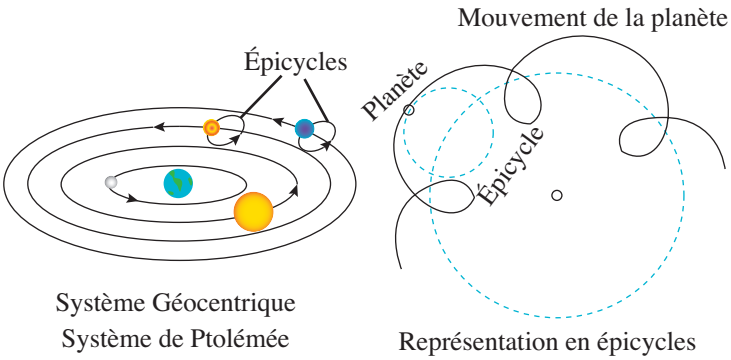


Figure 10.1 – Système de Ptolémée (à gauche) et représentation en épicycles (à droite)

Il faut attendre le XVI^e siècle pour envisager à nouveau la place de la Terre. À l'époque, deux représentations sont proposées. Celle de Copernic, en 1543, qui met le Soleil au centre du système planétaire, les planètes réalisant un mouvement circulaire régulier et celle de Tycho Brahé, vers 1570, où les planètes tournent autour du Soleil, ce qui explique les boucles dans les trajectoires, et le Soleil tourne autour de la Terre, ce qui donne une représentation à moitié héliocentrique et à moitié géocentrique. Le système de Copernic est contraire à la Bible et réfuté par l'Église, qui tolère cependant le système de Tycho Brahé.

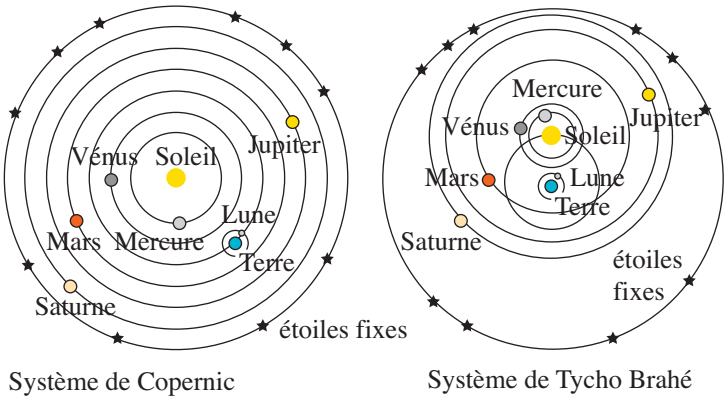


Figure 10.2 – Système de Copernic (à gauche) et de Tycho Brahé (à droite)

Visionner une animation présentant le système de Copernic avec live!

Au cours du XVII^e siècle, les observations de Galilée et les travaux de Kepler vont conforter l'héliocentrisme du système planétaire. En effet, Galilée remarque, avec

la première lunette astronomique, la présence de 4 satellites qui tournent autour de Jupiter. Quant à Kepler, il détermine la trajectoire elliptique des planètes autour du Soleil et établit trois lois de l'astronomie.

En 1687, la loi de gravitation de Newton permet d'expliquer cette disposition. Le Soleil, astre le plus massif du système solaire attire vers lui les planètes. Il en découle donc qu'il doit se trouver au centre du système planétaire.

Les siècles qui suivent confirment l'héliocentrisme du système planétaire. Les découvertes récentes sont en accord avec l'organisation du système solaire.

Cette approche historique permet de comprendre que le savoir scientifique se heurte souvent à des controverses (discussion avec des arguments s'opposant à l'idée proposée). Les nouvelles découvertes sont parfois difficiles à faire accepter à la majorité. Il faut donc convaincre en avançant des arguments cohérents. La controverse géocentrisme - héliocentrisme est résumée dans la figure qui suit.

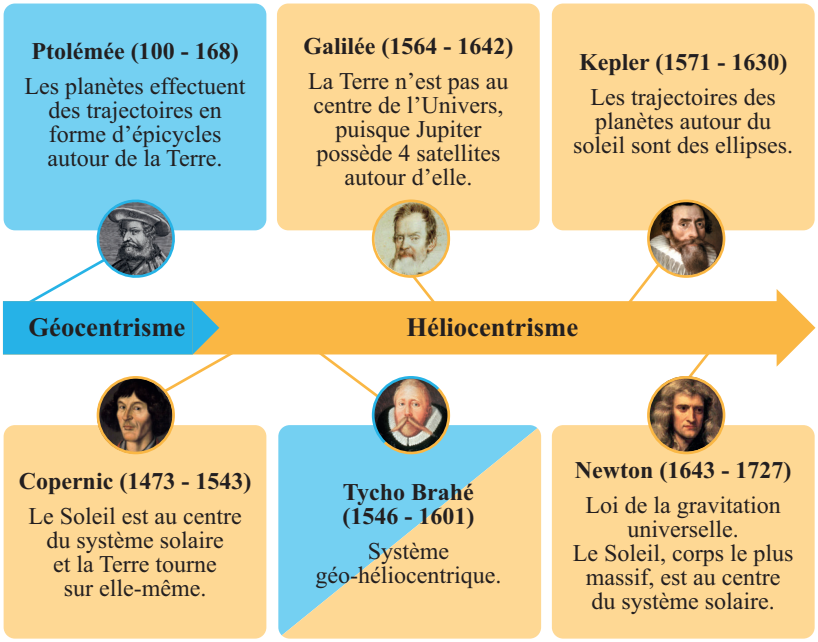


Figure 10.3 – La controverse géocentrisme - héliocentrisme

COURS

À RETENIR

Pendant des siècles, le modèle géocentrique de la Terre proposé par Ptolémée a été admis : la Terre se trouve au centre de l'Univers et tous les astres tournent autour d'elle. L'invention de la lunette astronomique a permis à Galilée de réfuter ce modèle au XVII^e siècle et confirmer la conception héliocentrique proposée par Copernic. Dans ce modèle, le Soleil est au centre de l'Univers et les planètes tournent autour de lui. Les découvertes postérieures modifient ce modèle en plaçant le Soleil au centre du système solaire et non plus de l'Univers. À la fin du XVII^e siècle, la théorie de Newton sur la gravitation validera définitivement la conception héliocentrique.

Voir exercices 2 page 243, 3 page 245 et 6 page 247.

3 Notre satellite naturel : La Lune

PROBLÉMATIQUE

Comment la connaissance de l'Univers a-t-elle permis la compréhension du mouvement de la Lune et de ses différentes phases ?

3.1 Rotation et révolution de la Lune

La Lune est le satellite naturel de la Terre. En se plaçant dans un référentiel géocentrique, la Lune décrit une *trajectoire quasi circulaire* autour de la Terre. Le plan de l'orbite lunaire (trajectoire de la Lune) est incliné par rapport à celui de la Terre autour du Soleil (plan de l'écliptique). On estime que la Lune fait un tour complet autour de la Terre en environ 27,3 jours (*période de révolution*). La Lune fait un tour sur elle-même en environ 27 jours (*période de rotation*). Ainsi, sa période de révolution étant pratiquement égale à sa période de rotation, la Lune présente toujours la même face à la Terre : on parle de *face visible* de la Lune (ce qui implique qu'il existe une face cachée).

3.2 Les phases de Lune

Observée dans le référentiel géocentrique, la Lune présente un aspect qui varie lors de son mouvement autour de la Terre : ce sont les phases de la Lune. Cette observation correspond au fait que pour un observateur situé sur Terre, une partie plus ou moins grande de la Lune est éclairée (la Lune diffusant la lumière solaire vers la Terre).

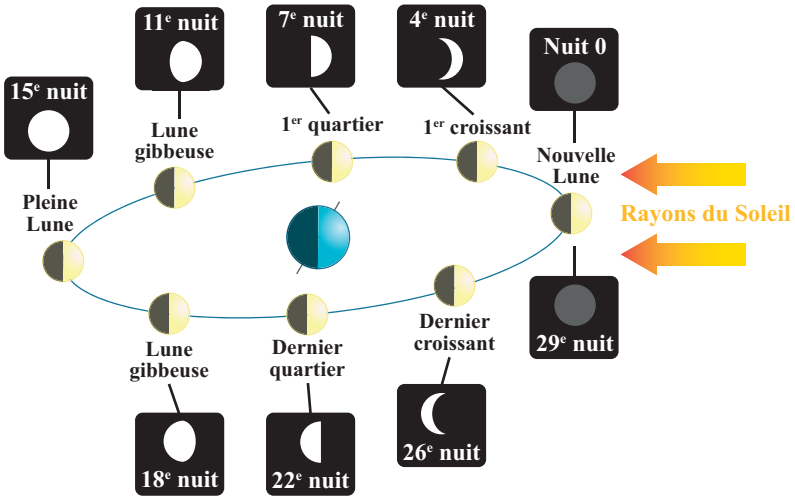


Figure 10.4 – Phases de la Lune au cours de sa période de révolution

La Lune apparaît de nouveau sous la même phase au bout de 29,5 jours. Cette période s'appelle la lunaison. Ces observations sont cohérentes avec le modèle héliocentrique et viennent ainsi conforter ce modèle.

Tout savoir sur la Lune en vidéo avec

À RETENIR

Dans un référentiel géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre sur une trajectoire quasi circulaire. Sa période de révolution (la Lune tourne autour de la Terre en 27,3 jours) et sa période de rotation (la Lune tourne sur elle-même en 27 jours) sont quasi-identiques, ce qui explique que la Lune présente toujours la même face à la Terre. La Lune permettant la diffusion des rayons du Soleil vers la Terre, chaque nuit une partie plus ou moins grande de la Lune est éclairée. La lunaison correspond à un cycle au bout duquel la Lune apparaît de nouveau sous la même phase (29,5 jours).

Voir exercices 4 page 245 et 5 page 246.

INTERROS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 250

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 Dans un système héliocentrique :

- **a** le Soleil a une trajectoire circulaire autour de la Terre ;
- **b** la Terre a une trajectoire circulaire autour de la Lune ;
- **c** la Lune a une trajectoire circulaire autour du Soleil ;
- **d** la Terre a une trajectoire circulaire autour du Soleil.

2 Dans un système géocentrique :

- **a** le Soleil a une trajectoire circulaire autour de la Terre ;
- **b** la Terre a une trajectoire circulaire autour de la Lune ;
- **c** la trajectoire de la Lune est descriptible ;
- **d** Mars décrit un mouvement circulaire.

3 Dans un système géocentrique, les planètes décrivent :

- **a** une ellipse ;
- **b** un cercle ;
- **c** une parabole ;
- **d** un épicycle.

4 La période de révolution de la Lune est :

- **a** 24 heures ;
- **b** 27 jours ;
- **c** 30 jours ;
- **d** 1 an.

5 Lorsque la Lune est située entre le Soleil et la Terre :

- **a** la Lune est en phase de nouvelle Lune.
- **b** la Lune est en phase de pleine Lune.
- **c** on observe parfois une éclipse de Lune.
- **d** on observe parfois une éclipse de Soleil.

Voir question 6 page suivante.

6 La phase de la Lune représentée ci-dessous est :



Figure 10.5 – Une phase de la Lune

a la nouvelle Lune ;
b le premier quartier ;
c la pleine Lune ;
d le dernier quartier.

2 Approche littéraire

★ 15 min Corrigé p. 250

Lycée Pasteur, Neuilly

Le texte ci-dessous est un extrait adapté de la pièce La vie de Galilée, écrite par Bertolt Brecht en 1938. La scène se déroule vers l'an 1600, dans le cabinet de travail de Galilée, à Padoue, près de Venise, en Italie.

Andréa est un adolescent ; c'est le fils de la gouvernante de Galilée.

ANDRÉA. Qu'est-ce que c'est ?
GALILÉE. Un astrolabe ; l'objet montre comment, d'après les anciens, les astres se déplacent autour de la Terre.
[...] *ANDRÉA. Au milieu, il y a une petite pierre.*
GALILÉE. C'est la Terre.
ANDRÉA. Tout autour, toujours l'un par-dessus l'autre, des anneaux. [...] *Sur les anneaux sont fixées des boules...*
GALILÉE. Les astres.
[...] *ANDRÉA. La boule tout en bas, c'est la Lune, c'est écrit. Et au-dessus il y a le Soleil.*
GALILÉE. Et maintenant, fais tourner le Soleil.
ANDRÉA, met en mouvement les sphères. C'est beau. Mais nous sommes si à l'étroit.
GALILÉE. Oui, j'ai ressenti ça aussi quand j'ai vu l'objet pour la première fois. [...] *Durant deux mille ans, l'humanité a cru que le Soleil et tous les corps célestes tournaient autour d'elle.* [...] *On avait toujours dit que les astres étaient fixés sur une voûte* [...] *pour qu'ils ne puissent pas tomber.*

INTERROS

Maintenant nous avons pris courage et nous laissons en suspens dans l'espace, sans soutien [...] *Et la Terre roule joyeusement autour du Soleil.*
[...]*ANDRÉA. Mais je le vois, que le soir, s'arrête ailleurs que le matin. Avec ça, il ne peut pas être immobile ! Jamais de la vie.*
GALILÉE. Tu vois ! Qu'est-ce que tu vois ? [...] *Il pose une petite table au milieu de la pièce. Ceci est le Soleil* [...] *Assieds-toi. Andréa s'assied sur une des chaises. Galilée est debout derrière lui. Où est le Soleil, à droite ou à gauche ?*
ANDRÉA. À gauche.
GALILÉE. Et comment ira-t-il à droite ?
ANDRÉA. Si vous le transportez à droite, naturellement.
GALILÉE. Seulement de cette manière ? Il le soulève avec la chaise et accomplit avec lui une demi- rotation. Où est maintenant le Soleil ?
ANDRÉA. À droite.
GALILÉE. Et il a bougé ?
ANDRÉA. Ça non.
GALILÉE. Qu'est-ce qui a bougé ?
ANDRÉA. Moi.
GALILÉE, hurle. Faux ! Idiot ! La chaise !
ANDRÉA. Mais moi avec elle !
GALILÉE. Évidemment. La chaise c'est la Terre. Tu es assis dessus.

1. Nommer l'astre situé au centre de l'astrolabe décrit par Galilée et Andréa.
2. Expliquer pourquoi cet astre était-il placé au centre des astrolabes sphériques de l'époque.
3. Donner hypothèse de Galilée sur le mouvement des astres.
4. Donner l'argument de bon sens qu'avance Andréa qui s'oppose à l'hypothèse de Galilée.
5. Nommer l'objet choisi par Galilée comme référence, pour étudier le mouvement dans son expérience. Nommer l'astre qui est représenté par cet objet.
6. Nommer le référentiel ainsi étudié.
7. Donner la propriété du mouvement qui est mise en évidence par cette expérience.
8. Faire un schéma avec la chaise, la table et Andréa qui explique la démonstration de Galilée.

3 Vénus en mouvement

★ 15 min Corrigé p. 251

Lycée Charlemagne, Paris

Vénus est une des quatre planètes telluriques du système solaire. Elle est la deuxième planète en s'éloignant du Soleil.

Données pour Vénus :

- Distance au Soleil : 108 millions de km.
- Période de révolution : 224,70 jours.
- Vitesse orbitale : $v = 35{,}02\ km.s^{-1}$.

Données pour la Terre :

- Distance au Soleil : 150 millions de km.
- Période de révolution : 365,25 jours.
- Vitesse orbitale : $v = 29{,}78\ km.s^{-1}$.

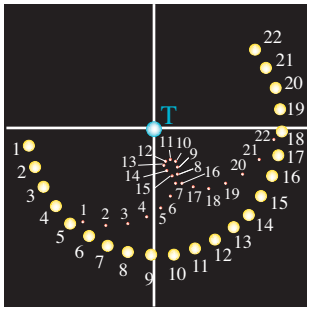


Figure 10.6 – Représentation des positions successives de la Terre (en bleu), du Soleil (en jaune) et de Vénus (en rouge).

1. Nommer le référentiel utilisé pour la représentation précédente.
2. Décrire le mouvement du Soleil dans ce référentiel.
3. Expliquer l'allure de la trajectoire de Vénus dans ce référentiel.
4. Donner le nom de la représentation qui permettait de prendre en compte la rétrogradation des planètes avant l'héliocentrisme. Nommer le personnage scientifique à l'origine de cette représentation.

4 Phases de la Lune et éclipse de Lune

★ 15 min Corrigé p. 251

Lycée « en forêt », Montargis

Une éclipse lunaire est le phénomène où l'ombre de la Terre couvre parfaitement la Lune. Pour qu'elle ait lieu, il faut que la Lune, le Soleil et la Terre soient alignés.

1. Faire un schéma de la situation.
2. Nommer la phase de la Lune dans le cas d'une éclipse de Lune.
3. Expliquer pourquoi une éclipse lunaire ne se produit pas tous les 29,5 jours.

Voici une photo de la phase de la Lune qui suit une éclipse lunaire.



Figure 10.7 – Phase post-éclipse

4. Nommer la phase de la Lune sur la photo.
5. Faire un schéma pour représenter la disposition de la Lune, du Soleil et de la Terre pour observer cette phase.

5 Phases de la Lune

★★ 15 min Corrigé p. 252

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

La Lune tourne sur elle-même en 27,3 jours et elle met le même temps pour faire le tour de la Terre.

La Terre tourne sur elle-même en 24 heures et elle met 365 jours pour faire le tour du Soleil.

La lunaison est le temps que met la Lune pour se retrouver dans la même phase. Du fait de la rotation de la Terre, cette durée est différente de la période de révolution de la Lune.

1. Expliquer le phénomène induit par la valeur identique de la période de révolution et la période de rotation de la Lune.
2. Schématiser la lunaison entre deux pleines Lunes.
3. Déterminer le temps entre deux pleines Lunes.
4. Calculer le nombre de lunaisons par an.

6 Observations des satellites de Jupiter ★★ 20 min Corrigé p. 253

Extrait du bac physique-chimie obligatoire-2010-Métropole

En 1610, le physicien italien Galilée découvre Io, Europe, Ganymède et Callisto, quatre satellites de Jupiter, à l'aide de sa lunette astronomique. Il relate ses observations dans un ouvrage, *Le messager des étoiles*, dans lequel il dessine également ce qu'il voit. Sur ses schémas, Galilée note « Ori. » la direction « Est » et « Occ. » la direction « Ouest ».

« Le 7 janvier de cette année 1610, à la première heure de la nuit, alors que j'observais les étoiles à la lunette, Jupiter se présenta, et comme je disposais d'un instrument tout à fait excellent je reconnus que trois petites étoiles, il est vrai toutes petites, mais très brillantes, étaient près de la planète [. . .].Je pensais que c'étaient des étoiles fixes, mais quelque chose m'étonnait : elles semblaient disposées en ligne droite, parallèlement à l'écliptique, et étaient plus brillantes que le reste des étoiles. Voici quelle était leur position les unes par rapport aux autres et par rapport à Jupiter :



Figure 10.8 – Croquis (a)

À l'est, se trouvaient deux étoiles, mais une seule à l'ouest [...]. *Je ne me préoccupais pas d'abord de leurs distances entre elles et Jupiter, car, comme je l'ai dit, je les avais prises pour des étoiles fixes. Mais quand, le 8 janvier, guidé par je ne sais quel destin, je regardais du même côté du ciel, je trouvais une disposition très différente. Les trois petites étoiles étaient en effet toutes à l'ouest de Jupiter et elles étaient plus proches entre elles que la nuit précédente* [...], *comme le montre le dessin ci-dessous :*



Figure 10.9 – Croquis (b)

[...] *Je commençais à me demander avec embarras comment Jupiter pouvait se trouver à l'est de toutes les étoiles fixes mentionnées plus haut alors que la veille il était à l'ouest de deux d'entre elles. »*

Les jours suivants, Galilée continue à observer cette région du ciel et réalise une série de croquis à l'échelle. Il comprend que les « étoiles » sont en réalité de petits astres tournant autour de Jupiter comme la Lune tourne autour de la Terre. Le 13 janvier, pour la première fois, il aperçoit quatre petites « étoiles ».



Figure 10.10 – Croquis (c)

INTERROS

Par rapport à Jupiter, les orbites des satellites sont pratiquement circulaires et appartiennent quasiment au même plan (P) qui est celui de l'équateur de Jupiter. Les orbites sont représentées sur la figure 10.11. Les positions des satellites sont indiquées à une date donnée. Le schéma a été réalisé sans souci d'échelle.

Vue de dessus

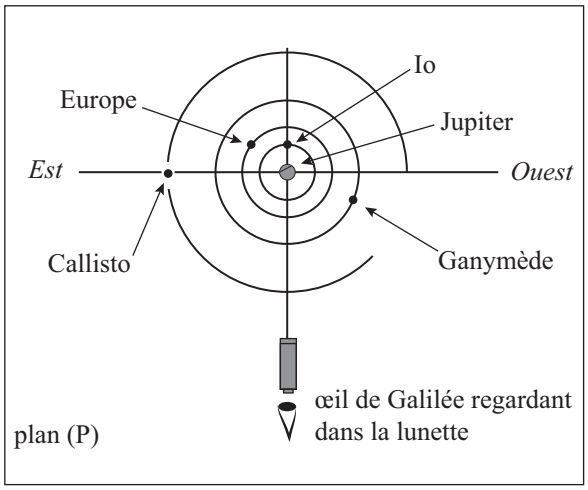


Figure 10.11 – Schéma de l'une des observations de Galilée

Date	Heure d'observation	Croquis de Galilée (documents d'époque)
8 fév. 1610	1h	
9 fév. 1610	0 h 30 min	
10 fév. 1610	1 h 30 min	
11 fév. 1610	1h	
12 fév. 1610	0 h 40 min	
13 fév. 1610	0 h 30 min	
14 fév. 1610	Ciel couvert	
15 fév. 1610	1h	
16 fév. 1610	Ciel couvert	
17 fév. 1610	1h	
18 fév. 1610	1h	
19 fév. 1610	0 h 40 min	
20 fév. 1610	Ciel nuageux	
21 fév. 1610	1 h 30 min	
22 fév. 1610	Ciel couvert	
23 fév. 1610	Ciel couvert	
24 fév. 1610	Ciel couvert	
25 fév. 1610	1 h 30 min	
26 fév. 1610	0 h 30 min	
27 fév. 1610	1h	
28 fév. 1610	1h	
1 mars 1610	0 h 40 min	
8 mars 1610	0 h 40 min	

Tableau 10.1 – Croquis réalisés à l'échelle par Galilée

1 *Étude de la trajectoire des satellites de Jupiter observés par Galilée.*

On admet que Galilée, regardant dans sa lunette depuis un point de la Terre, appartient au plan (P) défini précédemment.

(a) Justifier si la figure 10.11 correspond au croquis (a), (b) ou (c) ci-dessus.

(b) Donner une raison possible permettant d'expliquer pourquoi les quatre satellites ne sont pas toujours vus en même temps par Galilée.

(c) Donner la nature de la trajectoire des satellites de Jupiter vue par Galilée.

2 *Étude de la période de révolution du satellite Callisto autour de Jupiter.*

La figure 10.1 donne les croquis réalisés à l'échelle par Galilée entre le 8 février 1610 et le 2 mars 1610.

(a) À certaines dates, le satellite Callisto apparaît le plus éloigné de Jupiter pour Galilée. À l'aide de la figure 10.11, justifier cette observation.

(b) On cherche à déterminer la valeur approchée de la période T_C de révolution de Callisto autour de Jupiter. Le 11 février, Callisto apparaît pour Galilée comme étant le plus éloigné à l'est (« Ori. ») de Jupiter.

(i) Donner la date où Galilée voit de nouveau Callisto, le plus éloigné à l'est de Jupiter.

(ii) En déduire la valeur approchée de la période T_C.
Un résultat en nombre de jours entier est attendu.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 242

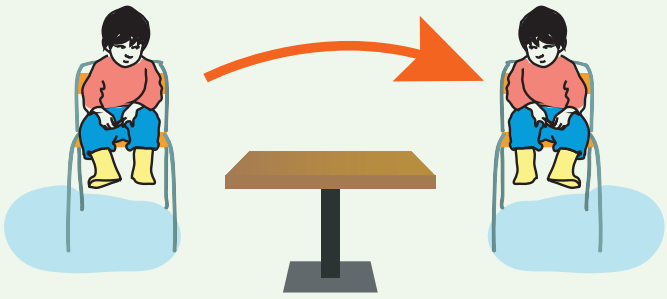
1. Réponse d.
2. Réponses a et c.
3. Réponse d.
4. Réponse b.
5. La Lune se trouve devant le Soleil, donc un observateur sur Terre voit la partie dans l'obscurité. Quand la Lune est bien alignée avec le Soleil, elle le cache, c'est une éclipse de Soleil. Réponses a et d.
6. La Lune décrit un P donc c'est le premier quartier. Réponse b.

2 Approche littéraire

Enoncé p. 243

Lycée Pasteur, Neuilly

1. [...] *ANDRÉA. Au milieu, il y a une petite pierre.*
GALILÉE. C'est la Terre. Donc l'astre situé au centre de l'astrolabe est la Terre.
2. À l'époque, les observations, depuis la Terre, permettaient d'expliquer les trajectoires des astres. Donc on plaçait la Terre immobile dans un Univers en mouvement autour d'elle.
3. Galilée émet l'hypothèse que le Soleil est au centre du système planétaire.
4. Depuis la Terre, on observe le déplacement des astres. Il est donc logique de mettre la Terre immobile.
5. [...] Il pose une petite table au milieu de la pièce. Ceci est le Soleil [...] Donc Galilée prend la table comme référence, il représente dans ce cas le Soleil.
6. Le Soleil est au centre du système donc le référentiel étudié est héliocentrique.
7. La propriété du mouvement qui est mise en évidence par cette expérience est la notion de référentiel. Suivant la position de l'observateur, la description du mouvement est différente.
8. L'illustration suivante représente la scène avec Andréa.



3 Vénus en mouvement

Enoncé p. 245

Lycée Charlemagne, Paris

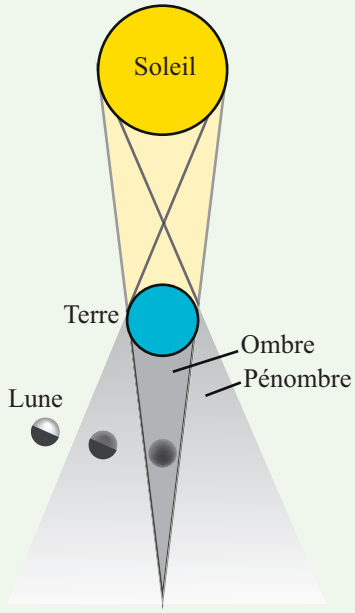
1. La représentation est centrée sur la Terre, donc le référentiel est géocentrique.
2. Le mouvement du Soleil, dans ce référentiel, est un mouvement circulaire.
3. La trajectoire de Vénus dans ce référentiel est curviligne, on a l'impression d'un retour en arrière. On parle de rétrogradation de Vénus.
4. Avant l'héliocentrisme, le système avec des épicycles permettait d'expliquer la rétrogradation des planètes. C'est Ptolémée qui propose ce système.

4 Phases de la Lune et éclipse de Lune

Enoncé p. 245

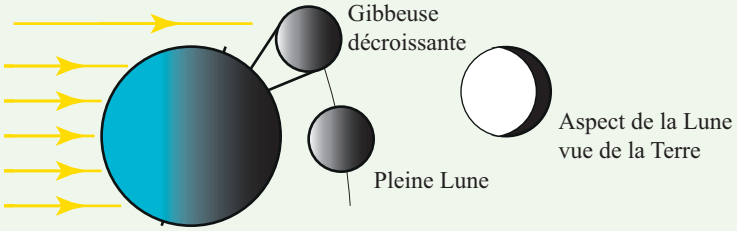
Lycée « en forêt », Montargis

1. La figure ci-dessous représente la situation.



2. Quand la Terre est située entre la Lune et le Soleil, on observe une pleine Lune.
3. Comme le plan orbital de la Lune est incliné par rapport à celui de la Terre, les éclipses ne peuvent avoir lieu que quand la Lune et la Terre sont alignées dans le même plan. Cet alignement n'a lieu qu'une ou deux fois par an.
4. La Lune décrit un d bien rempli donc c'est une Lune gibbeuse décroissante.

5 La figure ci-dessous représente le schéma de la disposition de la Lune, du Soleil et de la Terre.



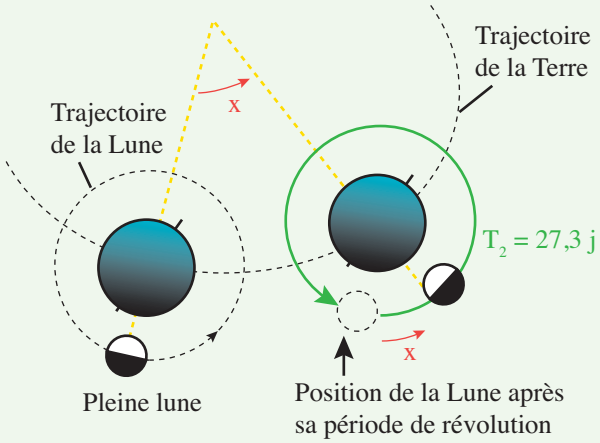
5 Phases de la Lune

Enoncé p. 246

Lycée Evariste Galois, Sartrouville

1 Dans un référentiel géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre en autant de temps qu'elle tourne sur elle-même. Elle montre alors toujours la même face à la Terre.

2 Voir la figure ci-dessous :



3 Notons la vitesse angulaire en tours par jours : $\omega = \dfrac{\theta}{t} \implies \theta = \omega \times t$.
La vitesse de la Lune est

$$\omega_L = \frac{1 \text{ tour}}{27{,}3 \text{ j}}.$$

La Lune fait un peu plus d'un tour pour être dans la même phase. Elle parcourt cet angle avec une durée supérieure à sa période de révolution, qu'on appelle lunaison, L.

$$1 + x = \omega_L \times L.$$

Pendant ce temps, la Terre décrit la proportion du tour, x :

$$x = \omega_T \times L,$$

où $\omega_T = 1$ tour / 365 j qui est la vitesse angulaire de la Terre. Donc en injectant x dans la première équation, on peut écrire :

$$1 + \omega_T \times L = \omega_L \times L \iff 1 = \omega_L \times L - \omega_T \times L$$

$$\iff 1 = L(\omega_L - \omega_T) \iff L = \frac{1}{\omega_L - \omega_T} = 29{,}5 \text{ jours.}$$

Donc le temps de lunaison est de 29,5 jours.

4 Le nombre de lunaisons par an est :

$$\frac{365 \text{ j}}{29{,}5 \text{ j}} = 12{,}4.$$

Donc il peut y avoir 12 lunaisons complètes dans une année.

6 Observations des satellites de Jupiter

Enoncé p. 247

Extrait du bac physique-chimie obligatoire-2010-Métropole

1 *Étude de la trajectoire des satellites de Jupiter observés par Galilée.*

(a) C'est le croquis (a), car Io est caché par Jupiter. Il voit donc deux satellites vers l'est, Callisto et Europe, et un satellite à l'ouest, Ganymède.

(b) Un satellite peut être caché par Jupiter. Les satellites peuvent être alignés. Ce sont deux raisons qui peuvent expliquer qu'on ne voit pas toujours tous les satellites.

(c) La nature de la trajectoire des satellites de Jupiter vue par Galilée est rectiligne.

2 *Étude de la période de révolution du satellite Callisto autour de Jupiter.*

(a) Le satellite Callisto décrit l'orbite avec le plus grand rayon.

(b) On cherche à déterminer la valeur approchée de la période T_C de révolution de Callisto autour de Jupiter.

Le 11 février, Callisto apparaît pour Galilée comme étant le plus éloigné à l'Est (« Ori. ») de Jupiter.

(i) La date où Galilée voit de nouveau Callisto est le 27 février 1610.

(ii) $T_C = 27 - 11 = 16$ jours. Donc la période de Callisto est de 16 jours.

Quatrième partie

SON ET MUSIQUE, PORTEURS D'INFORMATION

Chapitre 11

Le son, phénomène vibratoire

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Des vibrations dans la matière
3. Le son, du phénomène physique à la musique

1 Introduction

Depuis toujours, l'Homme perçoit de très nombreux sons issus de son environnement et utilise son ouïe pour les analyser. L'air ambiant réagit aux vibrations issues de la source d'un son en provoquant des oscillations qui se propagent jusqu'à notre oreille. Avec le temps, l'Homme a appris à maîtriser ce phénomène et à fabriquer des objets pour produire des sons destinés à communiquer, puis à se divertir.

PROBLÉMATIQUE

Comment produire un son ?

2 Des vibrations dans la matière

Les ondes acoustiques sont des ondes *mécaniques* (à l'inverse des ondes électromagnétiques, par exemple) qui ont besoin d'un milieu matériel pour se déplacer. Ce milieu matériel peut être solide, liquide ou gazeux. Une onde acoustique ne se propage pas dans le vide, faute de milieu matériel.

L'onde acoustique perturbe localement la pression de la matière et se propage dans l'espace par compressions / dilatations successives, sans déplacement de la matière elle-même.

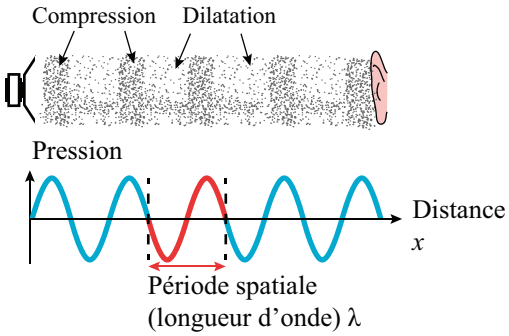


Figure 11.1 – Représentation spatiale de la propagation d'une onde acoustique à un instant donné

COURS

ANECDOTE

Contrairement à ce que laissent supposer les films de science-fiction, il est difficile, voire impossible, d'entendre une explosion dans l'espace. L'Univers est un milieu *lacunaire* où les différents éléments sont séparés par de grandes étendues de vide, qui empêchent la propagation du son.

2.1 Hauteur d'un son

Comme le montre le schéma précédent, un son pur est associé à une onde *sinusoïdale*. Il possède un motif élémentaire qui se répète périodiquement. La durée du motif est la période de l'onde.

L'onde peut également être caractérisée par une autre grandeur, appelée fréquence, qui est liée à la période par une relation mathématique.

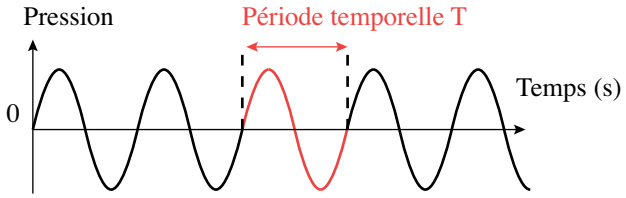


Figure 11.2 – Représentation temporelle d'une onde acoustique en un point donné

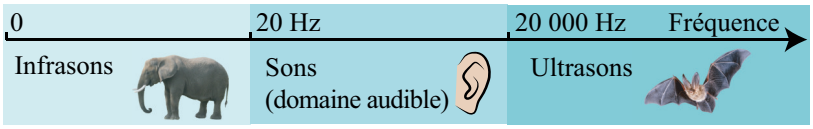
Définition 1

La *hauteur* d'un son est définie par sa fréquence en hertz, qui est le nombre de vibrations par seconde :

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

Plus la fréquence est faible, plus le son est grave.

Comme pour les ondes électromagnétiques, il existe plusieurs domaines d'ondes acoustiques :



En musique, une fréquence est associée à chaque note.

Exemple : la note *la*3 a pour fréquence $f(la3) = 440$ Hz.
À son octave supérieure, la note *la*4 a pour fréquence $f(la4) = 880$ Hz.

À RETENIR

Le son est une onde acoustique caractérisée par une fréquence, comprise entre 20 et 20 000 Hz.
C'est une onde mécanique, c'est-à-dire une perturbation d'un milieu matériel qui se propage dans l'espace sans transport de matière.
La fréquence de ce signal détermine la hauteur du son.

2.2 Timbre d'un son

Les signaux qui représentent les sons ne sont pas tous sinusoïdaux. Voici les signaux de deux instruments produisant la même note : un *la*4 de fréquence $f = 880$ Hz.

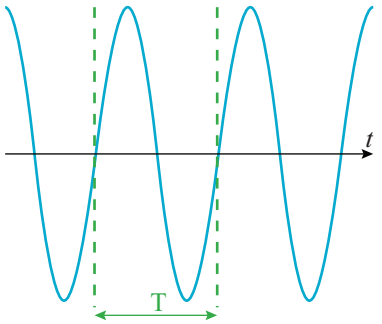


Figure 11.3 – Signal d'un diapason

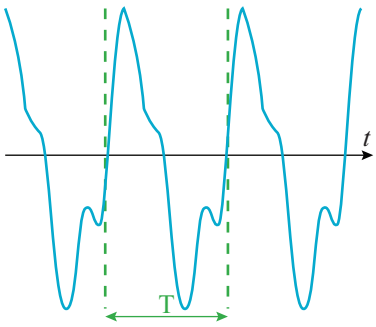


Figure 11.4 – Signal d'une flûte à bec

On observe que les deux signaux ont la même période T. Ils ont donc la même fréquence. On entendra donc la même hauteur de son.

Cependant, dans le cas du diapason, le signal est sinusoïdal. On parle de son *pur*, qui ne comporte qu'une seule fréquence.

Alors que dans le cas de la flûte à bec, on a un signal périodique non sinusoïdal. On parle de son *composé*, qui est constitué de plusieurs fréquences.

Écoutez le la4 produit par un diapason et par une flûte à bec avec

En 1807, Joseph Fourier énonce que tout signal périodique peut s'écrire comme une somme de signaux sinusoïdaux, de fréquences et d'amplitudes différentes.

Il en résulte que tout son composé peut être décomposé en une succession de sons purs.

La première de ces fréquences est appelée *fondamentale* ; les suivantes, qui en sont des multiples, sont appelées *harmoniques*.

COURS

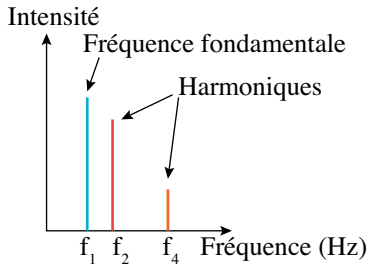
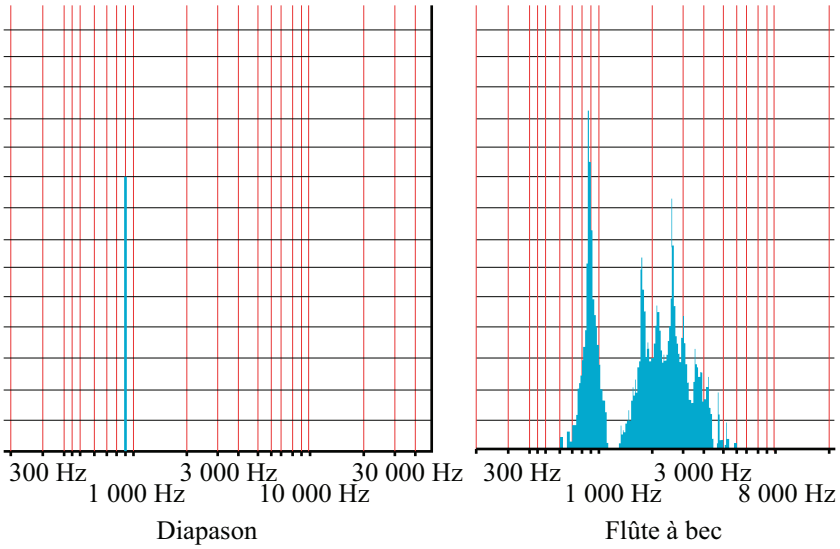


Figure 11.5 – Décomposition d'unson composé

À RETENIR

Un son composé est constitué de plusieurs fréquences.
La fréquence de base est la fondamentale et les autres fréquences forment les harmoniques.

Voici l'analyse spectrale des deux sons précédents (diapason et flûte à bec), réalisée avec le logiciel Audacity :



Le spectre du diapason présente une seule fréquence.

Celui de la flûte à bec présente plusieurs pics, avec de fortes amplitudes.

Définition 2

Le *timbre* d'un instrument ou d'une voix est défini par le nombre de fréquences harmoniques, ainsi que par leurs intensités respectives.

2.3 Volume d'un son

En physique, un signal est caractérisé par son amplitude. Dans le cas du son, il s'agit de la variation de pression par rapport à la pression atmosphérique, qu'on appelle *pression acoustique*. Plus la pression acoustique est grande, plus le son est fort.

Usuellement, on parle du volume du son. Pour avoir un son plus fort, il faut que la perturbation de départ soit plus grande, ce qui nécessite d'apporter plus d'énergie.

Définition 3

La *puissance sonore* est l'énergie sonore propagée en 1 seconde. Elle s'exprime en watts.

Sur les appareils audio, la puissance indiquée est le plus souvent la puissance électrique. Mais quand on achète de l'électroménager, le niveau sonore (en dB) est également fourni, ce qui permet de déterminer si l'appareil est bruyant ou pas.

Définition 4

L'*intensité sonore* I, exprimée en W.m^{-2}, est la puissance sonore reçue (en W) par unité de surface (en m^2).

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

Limites de l'audition humaine :

- pour $I < 1{,}0.10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}$, le son est trop faible pour être audible ;
- pôur $I > 1{,}0\ \text{W.m}^{-2}$, le son provoque une douleur dans l'oreille.

$I_0 = 1{,}0.10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}$ correspond au seuil d'audition (ou seuil d'audibilité) théorique.

Lorsqu'on utilise les W.m^{-2} pour représenter les valeurs des limites de l'audition humaine, on a des valeurs tellement petites (de l'ordre de 10^{-12}) qu'il est difficile de travailler avec cette unité.

Les scientifiques ont donc construit une nouvelle grandeur, plus facile à manipuler, à partir de la fonction mathématique *logarithme décimal* (log) : c'est le niveau sonore L, qui s'exprime en *décibels*. Son symbole est dB.

Pour convertir des W.m^{-2} en dB, on utilise la formule suivante :

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

où :

- L est le niveau sonore en décibel, en dB ;
- I est l'intensité sonore, en W.m^{-2} ;
- I_0 est l'intensité seuil ($I_0 = 1{,}0.10^{-12}\ \text{W.m}^{-2}$).

COURS

Exemple : calculons en dB le niveau sonore du seuil de douleur qui vaut $I = 1{,}0\ \text{W.m}^{-2}$.

$$L = 10 \times \log\left(\frac{1{,}0}{1{,}0.10^{-12}}\right) = 10\log\left(10^{12}\right).$$

On utilise la fonction log de la calculatrice :

log (10^{12}) = 12

après multiplication par 10, on trouve que le niveau sonore du seuil de douleur est donc de 120 dB.

La figure qui suit donne des exemples de niveaux sonores compris dans les limites de l'audition humaine.

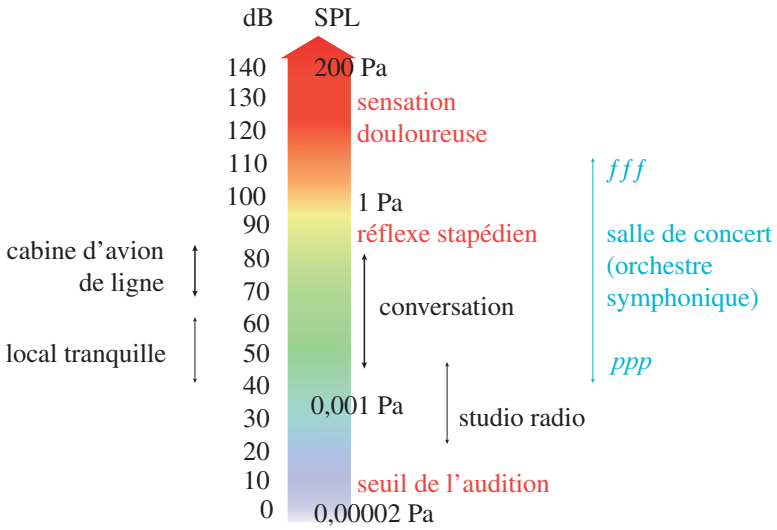


Figure 11.6 – Niveaux sonores compris dans les limites de l'audition humaine

À RETENIR

La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité sonore I (en W.m^{-2}).
Le niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels, selon une échelle logarithmique.

Voir exercice 7 page 270.

Remarques

- Chez l'Homme, lorsque le niveau sonore dépasse 80 dB, une contraction involontaire de certains muscles de l'oreille atténue le niveau des sons transmis à l'oreille interne : c'est le *réflexe stapédien*.
- Lorsqu'on double l'intensité sonore, comme par exemple dans le cas où deux personnes parlent ensemble, le niveau sonore augmente de 3 dB. Dans le cas d'une classe d'une vingtaine d'élèves qui se mettent à parler ensemble, l'augmentation du niveau sonore sera proche de 20 dB ! Le niveau d'intensité sonore n'est donc pas une grandeur qui augmente linéairement avec l'intensité sonore.

PROBLÉMATIQUE

Comment les caractéristiques d'un instrument modifient-elles le son ?

3 Le son, du phénomène physique à la musique

3.1 La corde vibrante

Définition 5

Une *corde vibrante* est un corps filiforme tendu entre deux points fixes. Elle est mise en vibration par un mouvement périodique, puis elle entre en résonance pour établir un signal composé de plusieurs fréquences.

Il est facile de voir que le son fondamental d'un tel système dépend des caractéristiques de la corde.

En tirant sur la corde, comme lorsqu'on accorde un instrument, la fréquence augmente. Le son dépend donc de la tension du fil.

Le son d'une corde dépend aussi de sa longueur : un musicien qui souhaite faire un son plus aigu sur une guitare va déplacer ses doigts le long de la corde. Plus la corde est courte, plus le son est aigu.

Enfin, les cordes n'ont pas le même diamètre ; ce paramètre est défini par la *masse linéique* de la corde, c'est-à-dire sa masse par unité de longueur. Plus la masse linéique est grande (corde de plus grand diamètre), plus la fréquence est faible, donc plus le son est grave.

À RETENIR

Une corde tendue émet un son composé.
La fréquence fondamentale de ce son dépend de la longueur, de la tension et de la masse linéique de la corde.
Plus la corde est longue ou épaisse, plus le son est grave.

COURS

3.2 Le tuyau sonore

Un *tuyau sonore* est une cavité rigide et creuse qui peut être fermée ou ouverte à son extrémité. Un courant d'air est propulsé dans son embouchure pour mettre en vibration l'air à l'intérieur du tuyau.

De manière analogue à la corde vibrante, les dimensions du tuyau sonore vont influencer la fréquence fondamentale émise : plus le tuyau sonore est long, plus la fréquence est grave.

Dans un orgue, ce sont les grands tuyaux que l'on voit au-dessus du clavier qui vont produire les sons. L'autre élément central est la soufflerie, qui permet de faire passer de l'air à l'intérieur des tuyaux.

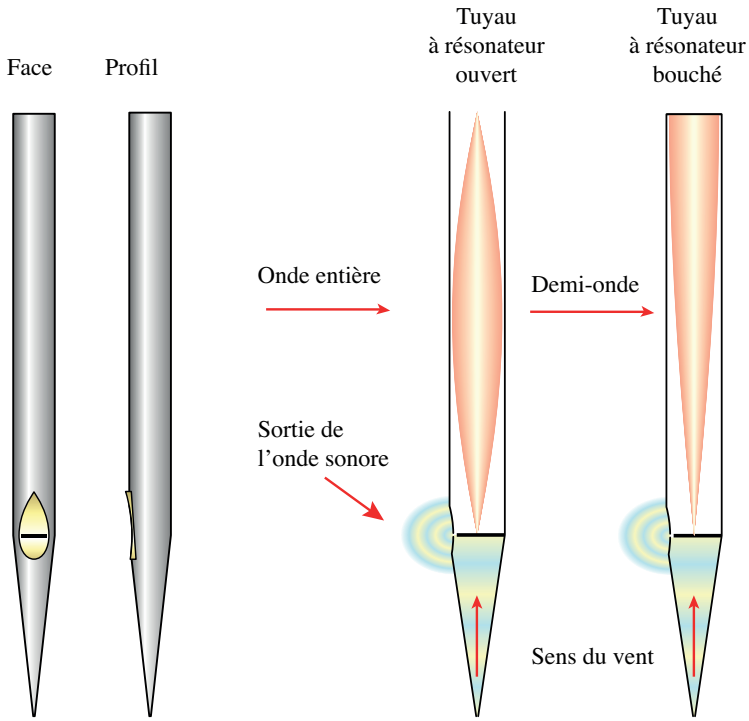


Figure 11.7 – Production du son dans un tuyau d'orgue

Un tuyau à résonateur ouvert produit une onde entière.

Un tuyau à résonateur ouvert produit une note située une octave *plus haut* que le même tuyau à résonateur bouché.

Sur la plupart des instruments à vent, on modifie la longueur du tuyau en bouchant des trous avec ses doigts, ce qui permet de faire varier la hauteur des sons.

De même, pour un trombone, on produit des sons de hauteurs différentes en allongeant ou réduisant la coulisse.

À RETENIR

Un tuyau émet un son composé.
La fréquence fondamentale de ce son dépend des dimensions du tuyau.
Plus le tuyau est long, plus le son est grave, donc la fréquence est basse.
Un tuyau à résonateur ouvert produit un son situé une octave plus haut que le même tuyau bouché.

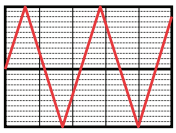
INTERROS

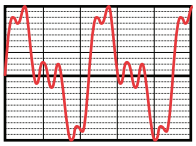
1 QCM Vérification des connaissances

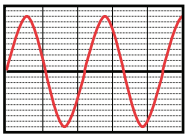
10 min Corrigé p. 272

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

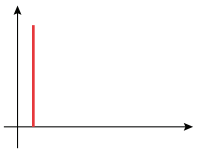
1 La représentation d'un son pur est :

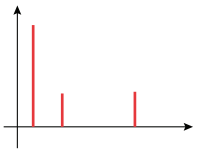
a 

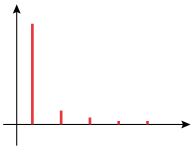
b 

c 

2 Parmi les spectres de fréquence suivants, lesquels représentent un son composé ?

a 

b 

c 

3 La fréquence d'un son caractérise :

a son timbre ;
b sa hauteur ;
c son intensité.

4 La fréquence qui définit un son s'appelle :

a primaire ;
b fondamentale ;
c harmonique.

5 L'intensité sonore dépend :

a de la puissance sonore ;
b de la surface traversée ;
c de la pression atmosphérique.

6 L'unité du niveau sonore est :

a $m.s^{-2}$; b W ; c dB.

7 La fréquence fondamentale d'une corde diminue quand :

a on augmente sa longueur ;
b on diminue sa longueur ;
c on augmente sa tension.

8 La fréquence fondamentale d'un tuyau sonore dépend :

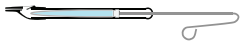
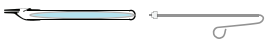
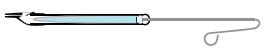
a de ses dimensions ;
b du matériau utilisé ;
c de son extrémité ouverte ou fermée.

2 Flûte alors !

★ 5 min Corrigé p. 272

Lycée Clémenceau, Nantes

Classer les flûtes à coulisse suivantes par ordre croissant de leur fréquence émise. Justifier.

1	2	3
		

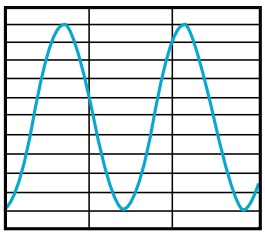
3 À chacun son spectre

★ 5 min Corrigé p. 272

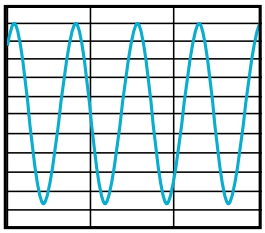
Lycée Saint-Martin, Rennes

Associer chaque spectre (chiffre) à son signal (lettre). Les échelles de temps (en abscisse) sont les mêmes pour tous les signaux.

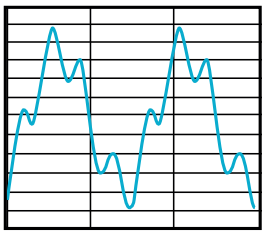
a



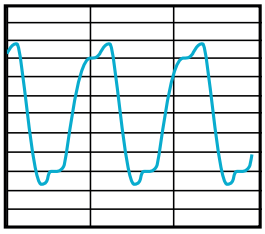
b



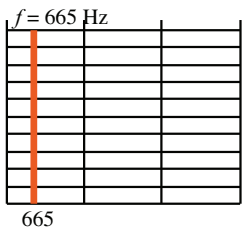
c



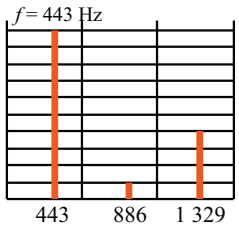
d



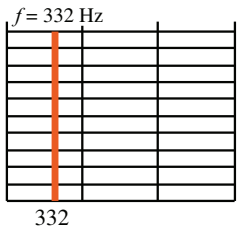
1



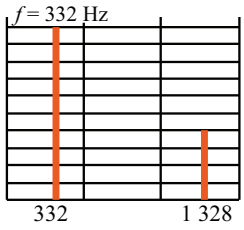
2



3



4



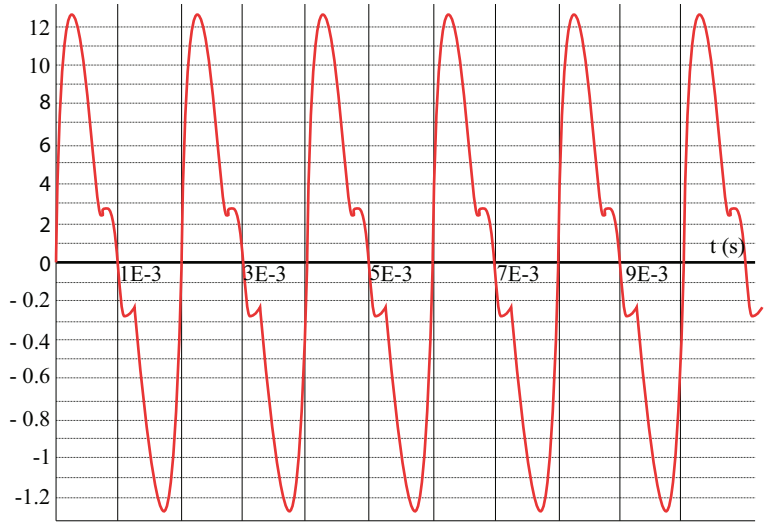
INTERROS

4 Analyse d'un signal

★ 10 min Corrigé p. 273

Lycée Claude Bernard, Paris

On veut analyser le signal composé suivant :



Remarque : le « E » signifie « dix puissance » : 1E-3 s correspond à 10^{-3} s.

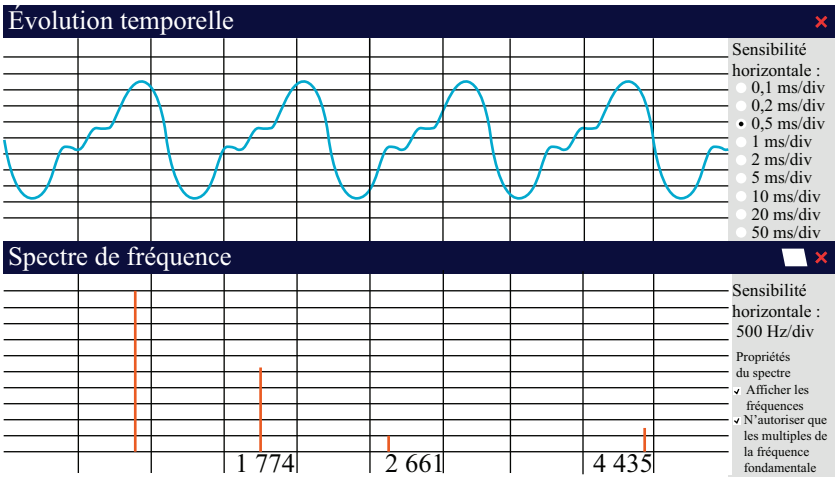
1. Déterminer la période du signal.
2. Calculer la fréquence.

5 Décrire un spectre composé

★ 10 min Corrigé p. 273

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

On considère le signal composé suivant :



1. Déterminer la fréquence fondamentale.
2. Donner le nombre d'harmoniques du signal.
3. Déterminer les rapports entre la fréquence de chaque harmonique et la fréquence fondamentale, et vérifier que les harmoniques sont des multiples de la fondamentale.

6 Son d'une guitare

★★ 15 min Corrigé p. 274

Lycée Montaigne, Bordeaux

On s'intéresse au son d'une guitare classique. Sur la figure qui suit, la corde rouge émet un *sol*2 quand elle est grattée à vide.

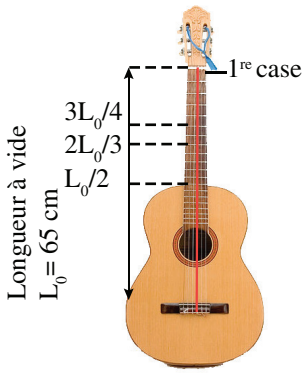
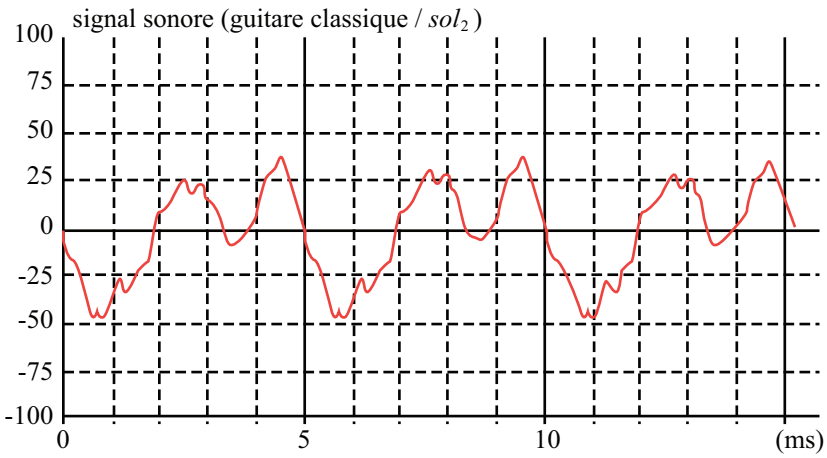


Figure 11.8 – Représentation d'une guitare classique

Le logiciel d'analyse de spectre audio fournit le signal suivant pour la note *sol*2 :



Données :

Fréquence du *sol*2 : 196 Hz.

Fréquence du *do*3 : 261,5 Hz.

1. Le son est-il pur ou composé ?
2. Déterminer la période du signal.
3. Retrouver la valeur de la fréquence du *sol*2 par le calcul. Comment expliquez-vous la différence avec la valeur donnée de 196 Hz ?
4. Donner le numéro de la case où il faut placer le doigt sur la corde rouge pour entendre un *do*3, en admettant que la longueur de la corde est inversement proportionnelle à la fréquence émise.

7 Niveau sonore lors d'un festival

★★★ 15 min Corrigé p. 275

Lycée Alexandre Dumas, Saint-Cloud

Lors d'un festival, les spectateurs peuvent se placer à différents endroits. Il faut que chacun puisse profiter de la musique dans les meilleures conditions. Au cours d'un concert, l'une des enceintes utilisées produit une puissance sonore de 5 W.

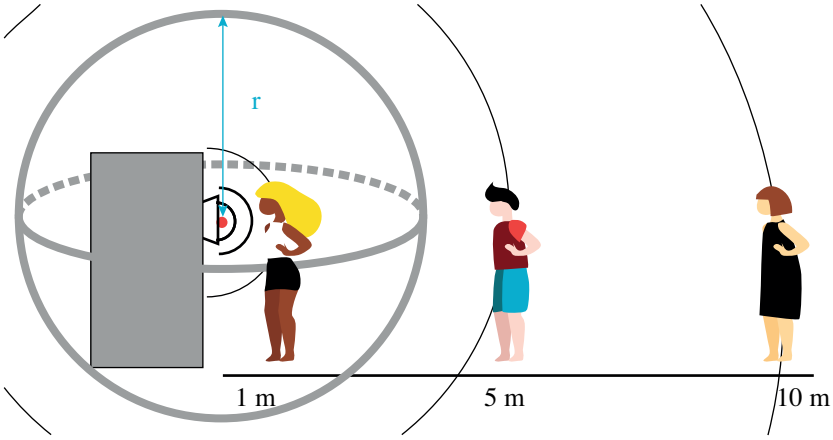


Figure 11.9 – Représentation de spectateurs dans un festival

Document : « Le niveau sonore légal en boîte de nuit et en festival passe de 105 à 102 décibels »

« En France, six à huit millions de personnes, soit entre 12 et 13 % de la population, sont touchées par des problèmes d'audition.

L'annonce risque de faire du bruit chez les professionnels du secteur Discothèques et festivals vont devoir se soumettre à une réglementation plus stricte concernant le niveau sonore de la musique qu'ils diffusent, selon une série de mesures publiées mercredi 9 août au Journal officiel, qui visent à "protéger l'audition du public".

Le niveau sonore moyen, mesuré sur quinze minutes, ne pourra plus dépasser 102 dB, détaille le décret, alors que le niveau maximal était fixé depuis 1998 à 105 décibels. Une différence sensible, car l'échelle des décibels n'est pas linéaire : retirer 3 décibels correspond à diviser l'intensité sonore par deux. Lorsque le public visé est constitué d'enfants jusqu'à 6 ans, la limite sera désormais établie à 94 décibels. [...] »

Extrait d'un article du Monde publié le 9 août 2017

L'enceinte qui émet avec une puissance de 5 W, est considérée comme une source sonore ponctuelle qui émet dans toutes les directions. La surface traversée par les ondes sonores est donc celle d'une sphère.

Surface d'une sphère de rayon r : $S = 4\pi r^2$.

1. Calculer l'intensité sonore pour chacune des trois distances des spectateurs : 1 m, 5 m et 10 m.
2. Calculer le niveau sonore perçu pour chaque valeur.
3. Expliquer la distance où les spectateurs doivent être placés pour répondre à la réglementation.
4. Déterminer le niveau sonore à une distance de 10 mètres si l'enceinte est utilisée à sa puissance maximale de 15 W.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 266

1. Un son pur est un signal sinusoïdal, réponse c.
2. Réponses b et c. Un son composé est la somme de plusieurs signaux sinusoïdaux donc il y a plusieurs fréquences dans le spectre.
3. Réponse b.
4. Réponse b.
5. Réponses a et b. L'intensité sonore se détermine par la relation $I = \frac{P}{S}$.
6. Réponse c.
7. Réponse a. La fréquence fondamentale d'une corde est inversement proportionnelle à la longueur de la corde et proportionnelle à la tension.
8. Réponses a et c.

2 Flûte alors !

Enoncé p. 267

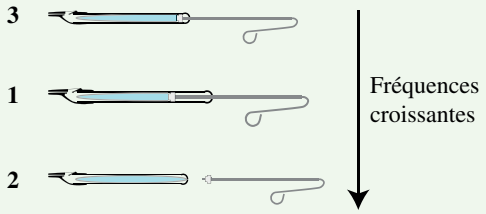
Lycée Clémenceau, Nantes

On sait d'après le cours que :

- plus un tube sonore est long, plus le son émis est grave et sa fréquence faible ;
- un tube résonateur ouvert produit une note située une octave plus haut que s'il était bouché.

La flûte qui produit le son le plus haut des trois est donc la flûte 2.

D'après la longueur de leurs tuyaux respectifs, on voit que la flûte 1 produit un son plus aigu que la flûte 3. Le classement des fréquences, qui correspond à la hauteur des sons émis, est donc le suivant :



3 À chacun son spectre

Enoncé p. 267

Lycée Saint-Martin, Rennes

A et B sont des signaux sinusoïdaux donc avec un spectre contenant une seule fréquence.

De plus, on observe que la période de A est plus grande que celle de B. Donc la fréquence de A est inférieure à celle de B.

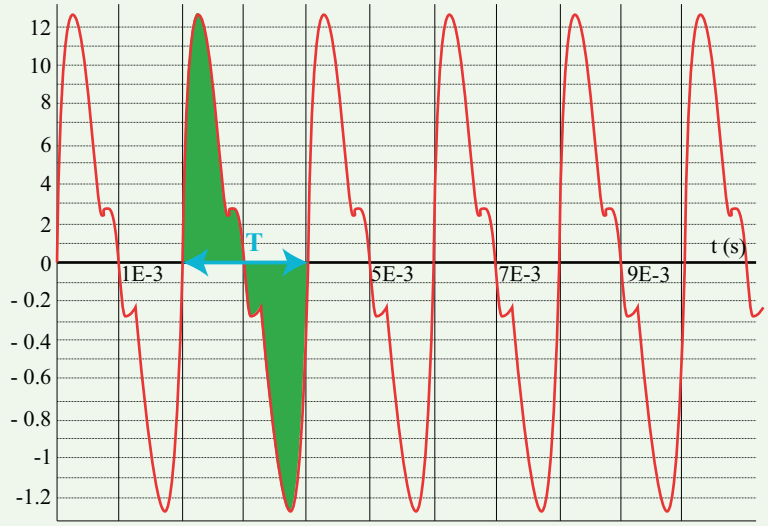
On observe par ailleurs que le signal C est un signal composé qui possède la même période que le signal B, donc la même fréquence fondamentale

A	B	C	D
3	1	4	2

4 Analyse d'un signal

Enoncé p. 268

Lycée Claude Bernard, Paris



1 À partir du graphique, on détermine que la période vaut $T = 2.10^{-3}$ s.

2 $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{2.10^{-3}} = 500$ Hz.

5 Décrire un spectre composé

Enoncé p. 268

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

1 En appliquant l'échelle 1,4 cm représente 0,5 ms, on peut calculer la période.

$$T = \frac{3{,}2 \text{ cm} \times 0{,}5 \text{ms}}{1{,}4 \text{ cm}} = 1{,}14 \text{ ms} = 1{,}14.10^{-3} \text{ s}.$$

Donc :

$$f_0 = \frac{1}{T} = \frac{1}{1{,}14.10^{-3} \text{ s}} = 877 \text{ Hz}.$$

2 Le nombre d'harmoniques du signal est 3.

3 $C = f/f_0$. D'après le graphique, les harmoniques ont pour fréquence 1 774, 2 661 et 4 435. On a donc les rapports de fréquence suivants :

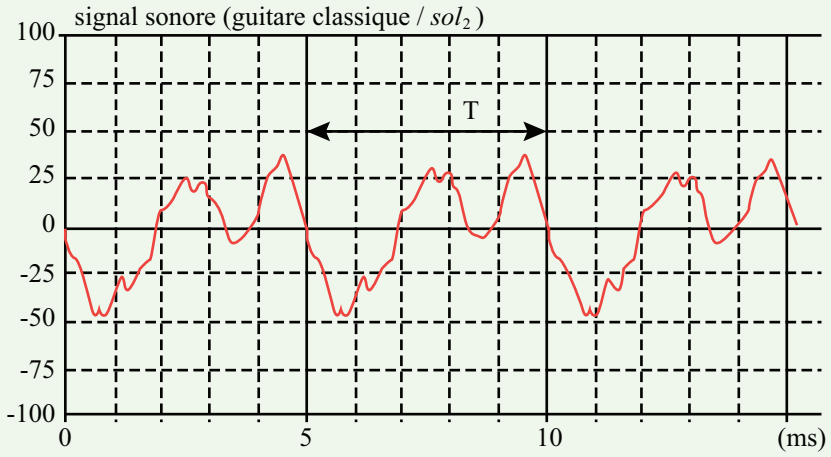
$$C_1 = \frac{1\,774}{877} = 2\ ;\ C_2 = \frac{2\,661}{877} = 3\ ;\ C_3 = \frac{4\,435}{877} = 5.$$

Les harmoniques sont bien des multiples de la fondamentale.

6 Son d'une guitare

Enoncé p. 269

Lycée Montaigne, Bordeaux



1 Le signal est seulement périodique, sans être sinusoïdal. Il s'agit donc d'un son composé.

2 D'après le graphique, la période,

$$T = 5 \text{ ms} = 5.10^{-3} \text{ s}.$$

3 $f(sol2) = \dfrac{1}{5.10^{-3}\text{ s}} = 200 \text{ Hz}.$

L'énoncé donne $f(sol2) = 196$ Hz ; on a une erreur sur le résultat qui peut s'expliquer par la précision du signal enregistré.

4 Le *do* supérieur est le *do*3 de fréquence $f(do3) = 261{,}5$ Hz.

$$\frac{f(do3)}{f(sol2)} = \frac{261{,}5 \text{ Hz}}{196 \text{ Hz}} = \frac{4}{3}.$$

Sachant que la longueur est inversement proportionnelle à la fréquence émise, on peut écrire :

$$L = \frac{k}{f} \quad \text{ou} \quad f = \frac{k}{L},$$

où k est une constante.

$$\frac{f(do3)}{f(sol2)} = \frac{\frac{k}{L}}{\frac{k}{L_0}} = \frac{4}{3} \Rightarrow L = \frac{3L_0}{4},$$

où L_0 est la longueur à vide de la corde *sol*2.

Donc d'après l'image, il faut placer le doigt sur la case 5, pour faire vibrer les trois quarts de la corde.

7 Niveau sonore lors d'un festival

Enoncé p. 270

Lycée Alexandre Dumas, Saint-Cloud

1 La surface traversée par l'onde émise de l'enceinte est une sphère de rayon r qui représente la distance entre la source et le spectateur.

En appliquant la formule de l'intensité sonore :

- Pour 1 m, $I = \dfrac{P}{S} = \dfrac{5\text{ W}}{4\pi \times (1\text{ m})^2} = 4.10^{-1}\text{ W.m}^{-2}$.
- Pour 5 m, $I = \dfrac{P}{S} = \dfrac{5\text{ W}}{4\pi \times (5\text{ m})^2} = 1{,}6.10^{-2}\text{ W.m}^{-2}$.
- Pour 10 m, $I = \dfrac{P}{S} = \dfrac{5\text{ W}}{4\pi \times (10\text{ m})^2} = 4.10^{-3}\text{ W.m}^{-2}$.

2 En appliquant la formule du niveau sonore :

- Pour 1 m, $L = 10 \times \log\left(\dfrac{4.10^{-1}\text{W.m}^{-2}}{1.10^{-12}}\right) = 116\text{ dB}$.
- Pour 5 m, $L = 10 \times \log\left(\dfrac{1{,}6.10^{-2}\text{W.m}^{-2}}{1.10^{-12}}\right) = 102\text{ dB}$.
- Pour 10 m, $L = 10 \times \log\left(\dfrac{4.10^{-3}\text{W.m}^{-2}}{1.10^{-12}}\right) = 96\text{ dB}$.

3 D'après l'article, le niveau sonore ne devra pas dépasser 102 dB, donc les spectateurs doivent se placer au minimum à 5 m de l'enceinte et à plus de 10 m, pour les enfants de moins de 6 ans.

4 Pour une distance de 10 mètres :

$$I = \frac{P}{S} = \frac{15\text{ W}}{4\pi \times (10\text{ m})^2} = 1{,}2.10^{-2}\text{ W.m}^{-2}$$

d'où :

$$L = 10 \times \log\left(\frac{1{,}2.10^{-2}\text{ W.s}^{-2}}{1.10^{-12}}\right) = 101\text{ dB}.$$

Quand l'enceinte est à pleine puissance, les spectateurs doivent se placer à plus de 10 mètres de la source sonore pour ne pas dépasser le niveau sonore réglementaire, au risque de se trouver un peu loin de la scène pour voir correctement les musiciens...

Chapitre 12

La musique, ou l'art de faire entendre les nombres

Plan du chapitre

1. Introduction
2. La gamme de Pythagore
3. La naissance de la gamme tempérée

1 Introduction

Dans l'Antiquité, les Grecs ont construit une vision très mathématique du monde qui les entourait. Au VI^e siècle avant Jésus-Christ, Pythagore a été le premier à développer une théorie mathématique permettant de relier les nombres à la musique.

PROBLÉMATIQUE

Comment théoriser la musique d'un point de vue mathématique ?

2 La gamme de Pythagore

Pythagore étudie les sons produits par différentes cordes vibrantes. Il remarque que lorsque qu'il prend des multiples entiers de la longueur d'une corde (l, $2l$, $3l$, $4l$, etc.), il obtient des sons *consonants*, c'est-à-dire agréables à l'oreille lorsqu'ils sont écoutés simultanément.

Au XVII^e siècle, la notion de fréquence d'un son est introduite. Lorsque la longueur de la corde est *multipliée* par 2, la fréquence du son est, quant à elle, *divisée* par 2.

La notion de fréquence permet de quantifier la différence de hauteur qui existe entre deux sons : un intervalle entre deux sons correspond au rapport de leurs fréquences au sens mathématique (quotient).

Définition 1

Une *octave* est un intervalle qui correspond à un rapport de fréquences égal à 2.

COURS

Définition 2

Une *quinte* est un intervalle qui correspond à un rapport de fréquences égal à 3/2.

La création d'une suite d'intervalles va être limitée par la taille de l'instrument du musicien. Comme deux sons dont le rapport de fréquences est égal à 2 correspondent à la même note, on va établir une échelle musicale au sein d'une octave. C'est ce qu'on appelle une *gamme*.

2.1 Construction de la gamme de Pythagore

La gamme de Pythagore repose sur des intervalles de quinte. Nous allons construire cette gamme à partir d'une note de fréquence f_1, donc sur l'octave comprise entre les deux sons de fréquences f_1 et $2f_1$.

- *1re quinte :* $\frac{3}{2}f_1$;
- *2e quinte :* on multiplie par 3/2 la fréquence de la 1re quinte : $\frac{3}{2}\left(\frac{3}{2}f_1\right) = \frac{9}{4}f_1$.
  Mais $\frac{9}{4}f_1 > 2f_1$ puisque $\frac{9}{4} = 2{,}25$. Pour ne pas sortir de la gamme, on prend la note située une octave en dessous, en divisant la fréquence précédente par deux :
  $$\frac{1}{2}\left(\frac{9}{4}f_1\right) = \frac{9}{8}f_1.$$
- *3e quinte :* $\frac{3}{2}\left(\frac{9}{4}f_1\right) = \frac{27}{8}f_1 > 2f_1$.
  Là encore, on prend la note située une octave en dessous, qui a donc pour fréquence :
  $$\frac{1}{2}\left(\frac{27}{8}f_1\right) = \frac{27}{16}f_1.$$

Le tableau suivant résume les douze premières quintes :

1re quinte $= \frac{3}{2}f_1$	5e quinte $= \frac{243}{128}f_1$	9e quinte $= \frac{19\,683}{16\,384}f_1$
2e quinte $= \frac{9}{8}f_1$	6e quinte $= \frac{729}{512}f_1$	10e quinte $= \frac{59\,049}{32\,768}f_1$
3e quinte $= \frac{27}{16}f_1$	7e quinte $= \frac{2\,187}{2\,048}f_1$	11e quinte $= \frac{177\,147}{131\,072}f_1$
4e quinte $= \frac{81}{64}f_1$	8e quinte $= \frac{6\,561}{4\,096}f_1$	12e quinte $= \frac{531\,441}{524\,288}f_1 \approx f_1$

$\frac{531\,441}{524\,288} = 1{,}013\,643$. La succession des 12 quintes boucle *presque* sur f_1. Pour pouvoir recommencer un cycle à partir de la même note, il a été décidé de modifier l'intervalle de la dernière quinte, pour retomber exactement sur f_1.

ANECDOTE

Cette dernière quinte étant dissonante comme un hurlement, on l'a appelée *quinte du loup*.

3 La naissance de la gamme tempérée

3.1 Construction de la gamme tempérée

Pour pouvoir jouer dans toutes les tonalités avec des instruments différents, les musiciens avaient besoin d'une gamme découpée en douze intervalles *égaux*. C'est ainsi qu'est apparue la gamme *tempérée* à la fin du XVII^{e} siècle.

Définition 3

La *gamme tempérée* est une échelle musicale qui divise l'octave en douze intervalles égaux nommés *demi-tons*.

Écoutez les 12 notes de la gamme tempérée avec live!

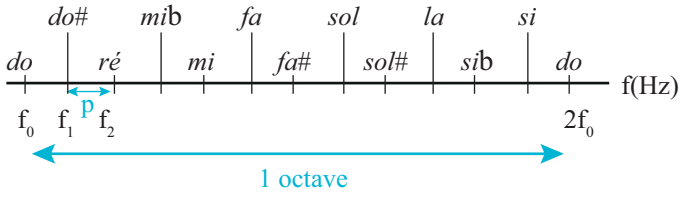


Figure 12.1 – Gamme tempérée

Dans cette gamme, deux notes consécutives sont séparées par un intervalle égal appelé *demi-ton*. Calculons la valeur p du rapport des fréquences correspondant à un demi-ton. Pour passer d'une fréquence à une autre (donc d'une note à une autre), on multiplie la fréquence de départ par p. On a donc :

$$f_2 = p.f_1 = p.p.f_0 = p^2.f_0.$$

$$p^2 = \frac{f_2}{f_0} \Longrightarrow p = \sqrt{\frac{f_2}{f_0}}.$$

Continuons le raisonnement sur une octave, soit 12 intervalles.

COURS

On a : $2f_0 = p^{12}.f_0$, donc $p^{12} = 2$.

En utilisant la fonction racine $n$ième, on peut écrire que $p = \sqrt[12]{2}$. On peut aussi écrire $p = 2^{1/12}$ dont la valeur approximative est 1,059. Voir l'annexe mathématiques page 361.

Propriété 1

Dans la gamme tempérée, le rapport entre deux notes consécutives est constant et égal à la racine douzième de 2, notée $\sqrt[12]{2}$.

$p = \sqrt[12]{2}$ est un nombre irrationnel, c'est-à-dire un nombre qui ne peut être écrit comme un rapport de deux nombres entiers.

Sa valeur peut être obtenue sur la calculatrice à l'aide de la touche $\sqrt[y]{x}$. Sur certaines calculatrices, cette touche est notée $x^{1/y}$.

En tapant : 2 $\sqrt[y]{x}$ 1 2, on obtient : $\sqrt[12]{2} \approx 1{,}059\,4\ldots$

Exemple : pour déterminer la fréquence f_4, il faut voir qu'il y a 4 intervalles de valeur p qui séparent f_0 de f_4. On a donc : $f_4 = p^4.f_0$.

Donc finalement, on peut écrire : $f_4 = (\sqrt[12]{2})^4 f_0 \simeq 1{,}26 f_0$.

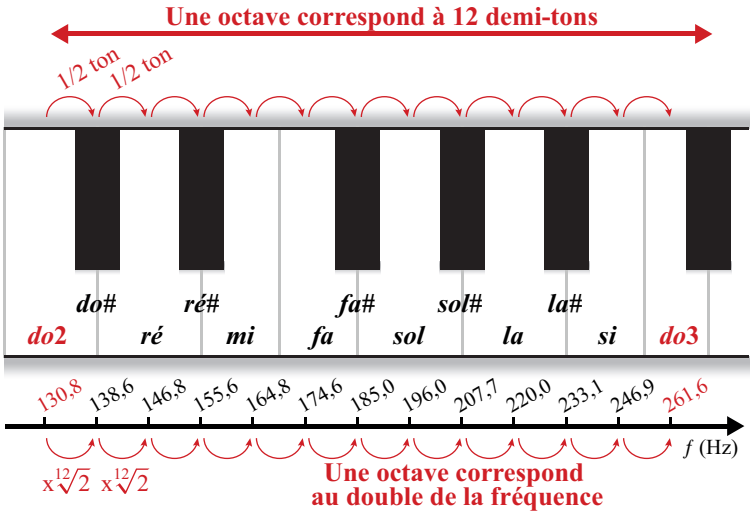
3.2 Exemple de la gamme tempérée de *do*

Pour fixer les idées, prenons l'exemple de la note *do*2 dont la fréquence est 130,8 Hz. La fréquence de la note suivante, *do#*2, est : $130{,}8 \times \sqrt[12]{2} = 138{,}6$ Hz.

En continuant ainsi demi-ton par demi-ton et en multipliant à chaque fois par $\sqrt[12]{2}$, on arrive à la note *si*2 dont la fréquence est : 246,9 Hz.

Puis *do*3 dont la fréquence est 261,6 Hz, qui est bien le double de celle de *do*2.

Le piano, qui utilise la gamme tempérée, permet d'illustrer cette progression :



Les valeurs des fréquences (en Hz) des notes du *do*1 au *si*4 sont données dans le tableau suivant :

Note \ Octave	1	2	3	4
do	65,41	130,81	261,63	523,25
do#/sib	69,30	138,59	277,18	554,37
ré	73,42	146,83	293,66	587,33
ré#/mib	77,78	155,56	311,13	622,25
mi	82,41	164,81	329,63	659,26
fa	87,31	174,61	349,23	698,46
fa#solb	92,50	185,00	369,99	739,99
sol	98,00	196,00	392,00	783,99
sol#/lab	103,83	207,65	415,30	830,61
la	110,00	220,00	440,00	880,00
la#/sib	116,54	233,08	466,16	932,33
si	123,47	246,94	493,88	987,77

Tableau 12.1 – Valeurs des fréquences des notes du do1 au si4

Le *la*3 dont la fréquence est de 440 Hz est la note donnée par le diapason. Il permet aux orchestres classiques de s'accorder. D'où l'expression « donner le *la* »...

3.3 Comparaison avec la gamme de Pythagore

Même si elles sont proches en terme de fréquences, donc de hauteur des notes, la gamme tempérée et la gamme de Pythagore sont différentes. Le tableau à la page suivante permet de comparer les valeurs en hertz des fréquences des notes d'une gamme pythagoricienne commençant en *do*4 avec les fréquence des notes de la gamme tempérée correspondante.

Contrairement à la gamme pythagoricienne, les intervalles de la gamme tempérée ne sont pas vraiment *consonants*, puisque les rapports de fréquence ne sont pas des entiers. En revanche, la gamme tempérée permet de facilement transposer une partition d'une tonalité à une autre, c'est-à-dire de décaler toutes les notes de la gamme d'un intervalle donné. Cela n'était pas possible avec la gamme pythagoricienne, à cause de la quinte du loup... Aujourd'hui, toutes les partitions sont construites à partir de la gamme tempérée, tandis que la gamme de Pythagore est tombée dans l'oubli.

Voir exercice 5 page 285.

COURS

Note	Gamme de Pythagore	Gamme tempérée
do	260,74	261,63
do#	278,44	277,18
ré	293,33	293,66
mi♭	309,03	311,13
mi	330,00	329,63
fa	347,65	349,23
fa#	371,25	369,99
sol	391,11	392,00
sol#	417,66	415,30
la	440,00	440,00
si♭	463,54	466,16
si	495,00	493,88
do	521,48	523,25

Tableau 12.2 – Comparaison des fréquences en hertz

À RETENIR

- À chaque note de musique correspond une *fréquence fondamentale* : plus celle-ci est élevée, plus la note est aiguë.
- Un intervalle entre deux notes est défini par le *rapport* de leurs fréquences fondamentales.
- Deux sons dont les fréquences sont dans un rapport de deux correspondent à une même note. L'intervalle qui les sépare s'appelle une *octave*.
- Une gamme est une suite finie de notes réparties sur une octave.
- On considérait dans l'Antiquité que seuls les sons qui avaient des rapports rationnels simples (1/2, 3/2, 4/3, etc.) étaient *consonants*, c'est-à-dire agréables à entendre lorsqu'on les joue simultanément.
- La gamme de Pythagore est construite sur des intervalles de *quintes*, c'est-à-dire des intervalles séparant des notes dont le rapport de fréquence vaut 3/2. Dans cette gamme, les intervalles entre deux notes *consécutives* ne sont pas identiques.
- La gamme *tempérée* est une suite de 12 notes séparées par des intervalles égaux (les demi-tons), dont le rapport de fréquence est $\sqrt[12]{2}$. Cette gamme permet de transposer les partitions et de faire jouer ensemble un grand nombre d'instruments différents.

1 QCM Vérification des connaissances

10 min — Corrigé p. 288

Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 Un intervalle musical (octave, quarte, quinte, …) correspond à :

a une différence des deux fréquences ;
b une somme des deux fréquences ;
c une puissance des deux fréquences ;
d un rapport des deux fréquences.

2 L'octave supérieure d'une fréquence fondamentale f_0 est caractérisée par la relation :

a $f = \frac{1}{2} f_0$.
b $f = \frac{3}{2} f_0$.
c $f = 2 f_0$.
d $f_0 = \frac{1}{2} f$.

3 Une gamme est une suite finie de notes :

a réparties dans une octave ;
b réparties dans une quinte ;
c réparties dans une douzième.

4 Le cycle des quintes :

a est défini par le rapport $3/2$ entre les fréquences successives ;
b est défini par le rapport $\sqrt[12]{2}$ entre les fréquences successives ;
c s'appelle la gamme tempérée ;
d s'appelle la gamme de Pythagore.

5 La répartition de 12 intervalles égaux dans une octave :

a est définie par le rapport de $3/2$ entre les fréquences successives ;
b est définie par le rapport de $\sqrt[12]{2}$ entre les fréquences successives ;
c s'appelle la gamme tempérée ;
d s'appelle la gamme de Pythagore.

6 Dans la gamme tempérée, le rapport de fréquences d'une quinte vaut :

a environ $3/2$;
b $(\sqrt[12]{2})^7$;
c $7 \times \sqrt[12]{2}$;
d $2^{7/12}$.

2 Le cycle des quintes est infini

★★ — 10 min — Corrigé p. 288

Lycée Claude Bernard, Paris

Démontrer mathématiquement que le cycle des quintes ne peut pas reboucler exactement sur la fréquence initiale, c'est-à-dire qu'il est infini.

INTERROS

3 La gamme tempérée

★★ 10 min Corrigé p. 289

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

Aujourd'hui, la plupart des musiciens s'accordent avec le *la*3, de fréquence $f_0 = 440$ Hz, mais cette référence a évolué au cours des siècles. Les scientifiques pensent que la référence à l'époque baroque était un *la* 415 Hz. Mais rappelons-nous que la notion de fréquence n'apparaît qu'au XVII^{e} siècle et à l'époque, on la mesure en cycles par seconde. Ce n'est qu'en 1960 que la Conférence générale des poids et mesures adopte le hertz comme unité internationale.

1. Démontrer que, dans la gamme tempérée, le rapport entre les fréquences de deux notes successives vaut $\sqrt[12]{2}$.
2. Vérifier les fréquences du *do*3 et du *do*4 en calculant au préalable le rapport de chacune de ces notes par rapport au *la*3 de référence.
3. Calculer le rapport entre le *la* de référence à l'époque baroque et le *la*3 actuel.
4. Déduire l'intervalle qui sépare ces deux fréquences.
5. Expliquer comment faire jouer un instrument classique avec un instrument baroque accordés selon des références différentes.

4 La gamme de Pythagore

★★★ 20 min Corrigé p. 290

Lycée Lakanal, Sceaux

1. Donner le nom de deux intervalles que les pythagoriciens trouvaient harmonieux. Qu'avaient-ils de particulier par rapport à une corde vibrante ?
2. On part d'une note dont la fréquence est 440 Hz. Quelle est la fréquence de la note à la quinte juste de cette première note ?
3. Trouver les fréquences arrondies à 10^{-2} Hz des notes correspondant à l'algorithme suivant :

Gamme de Pythagore

```
N[0] ← 440 Hz
Pour i de 0 à 11
    N[i+1] = N[i] x 3/2
    Si N[i+1] > 2 x N[0]
        N[i+1] ← N[i+1]/2
    Fin Si
Fin Pour
```

4. Classer ces notes par fréquences croissantes et donner leur nom (en sachant que 440 Hz correspond à un *la*).
5. Qu'appelle-t-on quinte du loup ?

Coup de pouce : l'algorithme se lit :

On attribue à N_0 la valeur 440 Hz. On va faire une boucle pour différents indices i qui prennent successivement toutes les valeurs entre 0 et 11 et on va dire que :

- $N_{i+1} = N_i \times \dfrac{3}{2}$
- Si N_{i+1} est supérieur à $2 \times N_0$ (c'est-à-dire $2 \times 440\text{ Hz} = 880\text{ Hz}$), on divise N_{i+1} par 2.

5 La famille des saxophones

★★★ 30 min Corrigé p. 291

Lycée Saint-Martin, Rennes

La famille des saxophones est composée d'instruments transpositeurs dont les principaux sont, du plus aigu au plus grave :

- le soprano, accordé en *si*♭ (lorsque le saxophoniste joue un *do*3 indiqué sur une partition, on entend un *si*♭2) ;
- l'alto, accordé en *mi*♭ ;
- Le ténor, accordé en *si*♭ ;
- Le baryton, accordé en *mi*♭.

Le saxophone fait partie de la famille des bois car l'émission du son s'effectue par une embouchure à anche. Cet instrument étant apparu au XIX^{e} siècle il n'est pas représenté dans la musique baroque et classique. Dans cet exercice, nous allons nous intéresser au saxophone soprano et au saxophone alto.
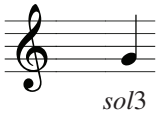
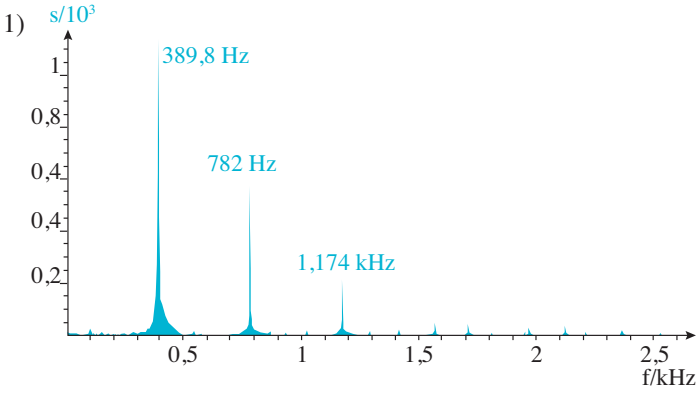


*Figure 12.2 – Clef et note de sol*3

Voir page suivante les spectres de trois instruments jouant la note de la partition ci-dessus.

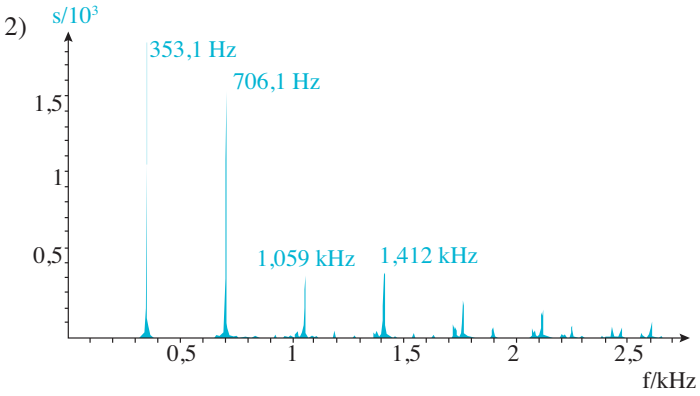
INTERROS

1)



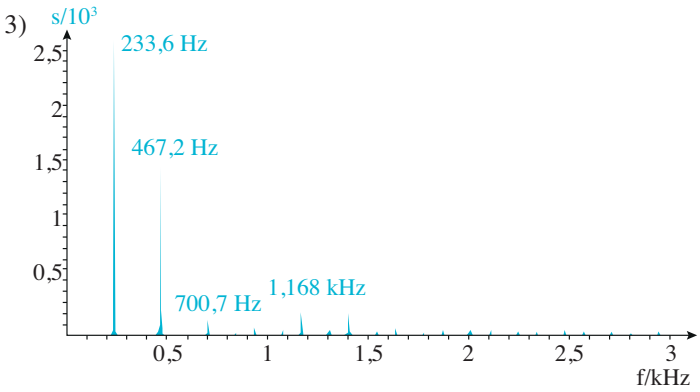
Écouter le son représenté par le spectre 1 avec

2)



Écouter le son représenté par le spectre 2 avec

3)



Écouter le son représenté par le spectre 3 avec

1 Relever la fréquence fondamentale de chaque spectre.

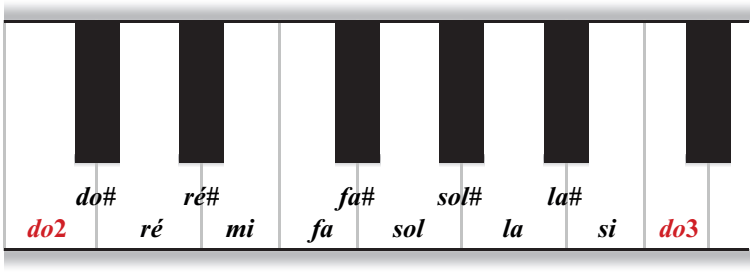
2 À l'aide du tableau des fréquences (voir tableau du §3.2 du cours page 281), donner le nom de la note proche des fréquences relevées à la question précédente.

3 Associer chaque spectre à l'un des instruments suivants : saxophone soprano, saxophone alto ou piano.

4 Calculer le rapport de fréquences des deux premières harmoniques avec la fréquence fondamentale pour chaque instrument.

5 Déterminer le nom des intervalles auxquels correspondent ces rapports.

On donne le schéma suivant :



6 Déterminer le nombre de demi-tons qui sépare le *si*♭ et le *do*.

7 Déterminer le nombre de demi-tons qui sépare le *do* et le *mi*♭.

8 Déterminer le nombre de demi-tons qui sépare la fréquence fondamentale spectre 1 de celle du spectre 2.

9 Déterminer le nombre de demi-tons qui sépare la fréquence fondamentale spectre 1 de celle du spectre 3.

10 Expliquer pourquoi les saxophones sont dits *transpositeurs*.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 283

1. Réponse **d**.
2. Réponses **c** et **d**.
3. Réponse **a**.
4. Réponses **a** et **d**.
5. Réponse **b** et **c**.
6. La gamme tempérée est composée de 12 intervalles identiques au sein d'une octave. Pour chaque intervalle, le rapport des fréquences est égal à $\sqrt[12]{2}$. Dans une quinte de la gamme tempérée, il y a 7 intervalles :
   do - do# ; *do# - ré* ; *ré - ré#* ; *ré# - mi* ; *mi - fa* ; *fa - fa#* ; *fa# - sol*.
   Le rapport des fréquences d'une quinte vaut :
   $$(\sqrt[12]{2})^7 \approx 1{,}5 = \frac{3}{2}.$$
   De plus, une racine $n$ième correspond à une puissance inverse : $\sqrt[n]{x} = x^{1/n}$, donc : $\sqrt[12]{2} = 2^{1/12}$.
   On peut donc écrire pour la quinte : $\left(2^{1/12}\right)^7 = 2^{7/12}$.
   Réponses **a**, **b** et **d**.

2 Le cycle des quintes est infini

Enoncé p. 283

Lycée Claude Bernard, Paris

Il est possible de calculer la fréquence f_n de la n^{e} quinte à partir de la fréquence f_0 grâce à la formule :

$$f_n = \left(\frac{3}{2}\right)^n f_0.$$

La fréquence f' correspond à la même note que celle de la fréquence f_0 (mais une ou plusieurs octaves plus aiguës) s'il existe un entier naturel p tel que $f' = 2^p f_0$.

Raisonnons par l'absurde : si le cycle des quintes pouvait reboucler sur la note initiale, c'est qu'il existerait n et p (entiers naturels) tels que

$$\left(\frac{3}{2}\right)^n f_0 = 2^p f_0.$$

Cela peut s'écrire, en simplifiant par f_0 : $\left(\frac{3}{2}\right)^n = 2^p$ ou encore $3^n = 2^{p+n}$.

Si n et p sont entiers, $p+n$ est entier également. Alors 3^n est toujours impair et 2^{p+n} est toujours pair.

L'égalité ci-dessus est donc impossible quelles que soient les valeurs de p et n, et le cycle des quintes ne reboucle donc pas.

3 La gamme tempérée

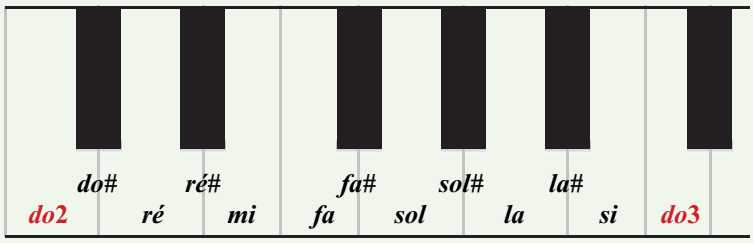
Enoncé p. 284

Lycée Jacques Amyot, Auxerre

1 Une octave correspond à un rapport de fréquence égal à 2. La gamme tempérée consiste à découper une octave en 12 intervalles égaux. Donc pour passer de f_0 à $2f_0$ il faut multiplier 12 fois par cet intervalle, x.
On peut donc écrire :

$$f_0 \times x^{12} = 2f_0 \implies x = \sqrt[12]{2}.$$

2 Voici une représentation d'un clavier où chaque note successive est séparée d'un demi-ton :



D'après le document précédent, il y a 9 intervalles entre le *do*3 et le *la*3 donc on multiplie 9 fois l'intervalle x soit $(\sqrt[12]{12})^9$. Comme on est sur un intervalle descendant entre *do*3 et *la*3, il faut résoudre l'équation d'inconnue f suivante :

$$\frac{f_{la3}}{f} = (\sqrt[12]{2})^9.$$

On en déduit la fréquence du *do*3 :

$$f = \frac{440 \text{ Hz}}{(\sqrt[12]{2})^9} = 262 \text{ Hz}.$$

Pour le *do*4, il y a 3 intervalles ascendants donc :

$$\frac{f}{f_{la3}} = (\sqrt[12]{2})^3.$$

On en déduit la fréquence du *do*4 : $f = 440 \text{ Hz} \times (\sqrt[12]{2})^3 = 523 \text{ Hz}$.

3 Le *la*3 a pour fréquence $f_0 = 440$ Hz et le La baroque a pour fréquence $f = 415$ Hz.

$$\frac{f_0}{f} = \frac{440}{415} = 1{,}06,$$

ce qui correspond à $\sqrt[12]{2}$. C'est donc un demi-ton qui sépare les 2 références. Donc les instruments du baroque seraient accordés sur un *sol*#3 de la gamme tempérée actuelle.

4 Pour faire jouer un instrument classique avec un instrument baroque, il faudrait transposer l'une des partitions d'un demi-ton.

CORRIGÉS

4 La gamme de Pythagore

Enoncé p. 284

Lycée Lakanal, Sceaux

1 Les intervalles considérés comme les plus harmonieux par les pythagoriciens étaient :

- l'octave : rapport de 2 dans la longueur des cordes (une corde pincée à la moitié de sa longueur permet de monter la note d'une octave) ;
- la quinte : rapport de 3/2 dans la longueur des cordes (une corde pincée au 2/3 de sa hauteur permet de monter la note d'une quinte).

Remarque : les pythagoriciens appréciaient également la quarte, c'est-à-dire une rapport de 4/3 dans la longueur des cordes.

2 Si une note a une fréquence f_0, la fréquence de la note à la quinte juste après cette note est $f_1 = \frac{3}{2} f_0$. Donc $f_1 = 660$ Hz.

3 Suivons l'algorithme :
$N[0] = 440$.
$\frac{3}{2} \times N[0] = 660$. Comme $660 < 880 \ (= 2 \times 440)$, $N[1] = 660$.
$\frac{3}{2} \times N[1] = 990$. Comme $990 > 880$, $N[2] = \frac{990}{2}$, soit $N[2] = 495$.
$\frac{3}{2} \times N[2] = 742{,}5$. Comme $742{,}5 < 880$, $N[3] = 742{,}5$.
$\frac{3}{2} \times N[3] = 1113{,}75$. Comme $1113{,}75 > 880$, $N[4] = \frac{1113{,}75}{2}$, soit $N[4] = 556{,}87$.
De même, on trouve (en n'arrondissant que la valeur indiquée mais en gardant la valeur exacte pour les calculs) :
$N[5] = 835{,}31$; $N[6] = 626{,}48$; $N[7] = 469{,}86$; $N[8] = 704{,}79$
$N[9] = 528{,}59$; $N[10] = 792{,}89$; $N[11] = 594{,}67$; $N[12] = 446{,}00$.

4 On obtient donc le classement suivant :

$$N[0](\approx N[12]) < N[7] < N[2] < N[9] < N[4] < N[11] < N[6] < N[1] < N[8] < N[3] < N[10] < N[5].$$

Note d'après l'algorithme	$N[0]$ $(\approx N[12])$	$N[7]$	$N[2]$	$N[9]$
Fréquence de la note (en Hz)	$440 \approx 446$	469,86	495	528,59
Nom de la note	*la*	*la#*	*si*	*do*

Note d'après l'algorithme	$N[4]$	$N[11]$	$N[6]$	$N[1]$
Fréquence de la note (en Hz)	556,87	594,67	626,48	660
Nom de la note	*do#*	*ré*	*ré#*	*mi*

Note d'après l'algorithme	$N[8]$	$N[3]$	$N[10]$	$N[5]$
Fréquence de la note (en Hz)	704,79	742,5	792,89	835,31
Nom de la note	*fa*	*fa#*	*sol*	*sol#*

On a créé une gamme, car on finit par retomber sur une valeur très proche de la note de départ ($f_0 = 440$ Hz et $f_{12} = 446$ Hz), qui correspond donc (à peu près) à la même note. On indique ensuite les notes de la gamme par ordre de fréquences croissantes en partant du *la*.

5 L'intervalle de 12 quintes justes correspond à un intervalle très légèrement supérieur à 7 octaves. Pour que 12 quintes correspondent exactement à 7 octaves, on décompose ces 7 octaves en 6 quintes justes et une septième quinte très légèrement raccourcie. Cette quinte raccourcie est appelée « Quinte du loup » car elle est dissonante et rappelle le hurlement d'un loup.

5 La famille des saxophones

Enoncé p. 285

Lycée Saint-Martin, Rennes

1 **Spectre 1 :** 389,8 Hz.

Spectre 2 : 353,1 Hz.

Spectre 3 : 233,6 Hz.

2 **Spectre 1 :** 389,8 Hz → *sol*3.

Spectre 2 : 353,1 Hz → *fa*3.

Spectre 3 : 233,6 Hz → *la#*2.

3 **Spectre 1 :** 389,8 Hz → *sol*3 donc c'est le spectre du piano qui n'est pas transpositeur.

Spectre 2 : 353,1 Hz → *fa*3 donc c'est le spectre du soprano qui est accordé en *si*♭. Le son perçu est plus grave que la note jouée.

Spectre 3 : 233,6 Hz → *la#*2 donc c'est le spectre de l'alto.

4 **Spectre 1 :**

$$\frac{782 \text{ Hz}}{389{,}8 \text{ Hz}} = 2 \text{ et } \frac{1\,174 \text{ Hz}}{389{,}8 \text{ Hz}} = 3.$$

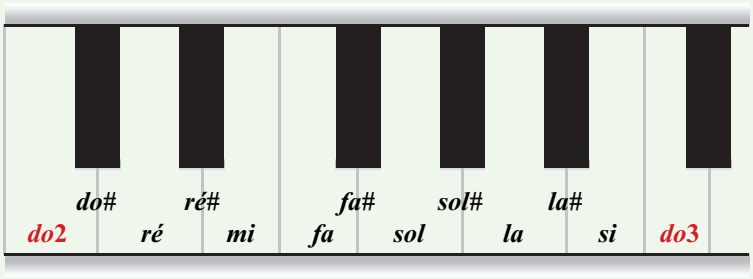
Spectre 2 :

$$\frac{706 \text{ Hz}}{353{,}1 \text{ Hz}} = 2 \text{ et } \frac{1\,059 \text{ Hz}}{353{,}1 \text{ Hz}} = 3.$$

Spectre 3 :

$$\frac{467{,}2 \text{ Hz}}{233{,}6 \text{ Hz}} = 2 \text{ et } \frac{700{,}7 \text{ Hz}}{233{,}6 \text{ Hz}} = 3.$$

5 Quand le rapport vaut 2, c'est une octave et quand le rapport vaut 3, c'est une quinte de l'octave supérieure.



6 Entre le *si*♭ et le *do*, il y a 2 demi-tons.

7 Entre le *do* et le *mi*♭, il y a 3 demi-tons.

8 Spectre 2 : *fa*3 jusqu'au *sol*3 du spectre 1, il y a 2 demi-tons.

9 Spectre 3 : *la#*2 jusqu'au *sol*3 du spectre 1, il y a 9 intervalles soit 12 intervalles de l'octave, pour faire *la#*3 puis on retranche 3 intervalles pour arriver au *sol*3 et ainsi raisonner dans la même octave.

10 Quand un saxophone joue un *sol* sur sa portée, le son émis ne correspond pas. Dans le cas du saxophone soprano, on entend un *fa* et dans le cas de l'alto, un *la*, il faut donc adapter les notes, ce sont donc des instruments transpositeurs.

11 Le saxophone soprano joue un ton au-dessus de la note entendue. Donc pour jouer avec un instrument en *do* Majeur, la partition du soprano doit être en *ré* Majeur soit, d'après le cycle des quintes, avec deux # à la clé.

Le saxophone alto joue un ton et demi au-dessous de la note entendue. Donc pour jouer avec un instrument en *do* Majeur, la partition de l'alto doit être en *la* Majeur soit, d'après le cycle des quintes, avec trois # à la clé.

Chapitre 13

Le son, une information à coder

Plan du chapitre

1. Numérisation
2. Taille d'un fichier audio
3. Compression d'un fichier audio

La numérisation permet la conversion d'un signal électrique en données numériques qui pourront être exploitées par des dispositifs informatiques ou électroniques. Il est possible de numériser par exemple des images, des vidéos, de la musique ou du texte.

PROBLÉMATIQUE

Comment transformer un signal sonore en signal numérique ?

1 Numérisation

Lorsque l'on veut enregistrer un son pour le stocker sur un support numérique (CD, ordinateur, smartphone, etc.), on utilise un micro.

Le micro permet de transformer le son en signal électrique, que l'on peut mesurer par une tension par exemple. Mais pour stocker ce signal, il va falloir le numériser, c'est-à-dire le transformer en langage binaire (une succession de 0 et de 1).

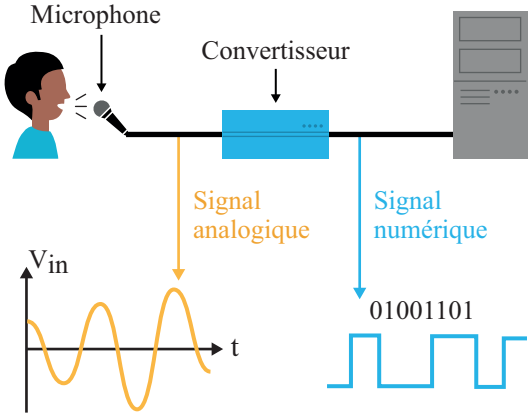


Figure 13.1 – Chaîne de numérisation d'un son

COURS

La numérisation a lieu en deux étapes : l'échantillonnage et la quantification.

1.1 Échantillonnage

Le micro permet de capturer un signal dit analogique que l'on représente par une courbe continue (voir figure 13.2, courbe jaune). Pour numériser ce signal, il va falloir convertir le signal analogique, constitué d'un nombre infini de valeurs, en un signal numérique constitué d'un nombre fini de valeurs. On va pour cela *échantillonner* le signal, c'est-à-dire ne garder que certaines valeurs prises à intervalle de temps régulier (voir figure 13.2, points bleus). Ce sont les valeurs de ces échantillons que l'on cherchera à stocker numériquement.

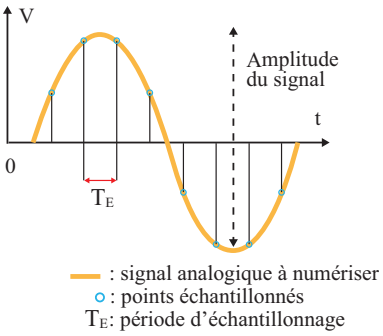


Figure 13.2 – Échantillonnage d'un signal

La durée entre deux échantillons est appelée *période d'échantillonnage*. Elle est souvent notée T_E. La fréquence d'échantillonnage f_E vaut :

$$f_E = \frac{1}{T_E}.$$

Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée, plus la durée entre deux échantillons sera courte et plus le signal numérique reproduira fidèlement le signal analogique de départ.

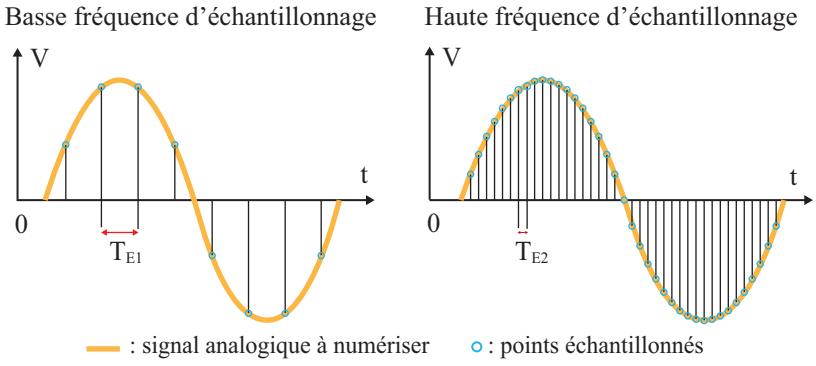


Figure 13.3 – Exemple de signaux obtenus avec deux fréquences d'échantillonnage différentes.

On considère que pour reproduire fidèlement une note, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit au moins le double de la fréquence de cette note.

C'est le critère de Shannon.

Exemple : dans la figure qui suit, on voit que la fréquence du signal échantillonné (en bleu) ne correspond pas du tout à la fréquence du signal initial (en jaune). Les deux courbes sont trop différentes car la fréquence d'échantillonnage est insuffisante.

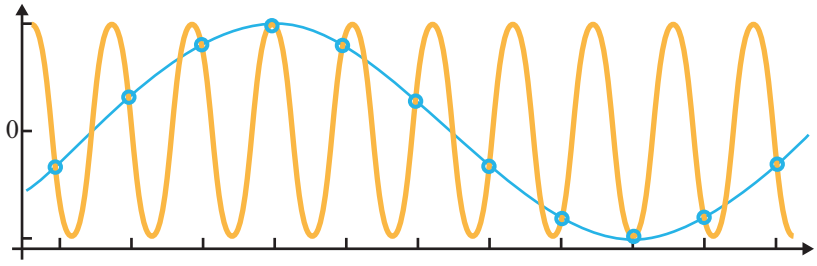


Figure 13.4 – Exemple d'échantillonnage insuffisant

Notons néanmoins que plus on augmente la fréquence d'échantillonnage, plus on aura d'échantillons à stocker.

1.2 La quantification

Une fois le signal échantillonné, il va falloir le coder en binaire pour pouvoir le stocker.

Le binaire est un codage de l'information qui stocke les données sous forme de bits (contraction de **bi**nary digi**t**) qui ne peuvent être que dans deux états : 0 ou 1.

Avec 1 bit, il est possible de stocker deux valeurs (0 ou 1).

Avec 2 bits, il est possible de stocker 4 valeurs (00 01 10 et 11).

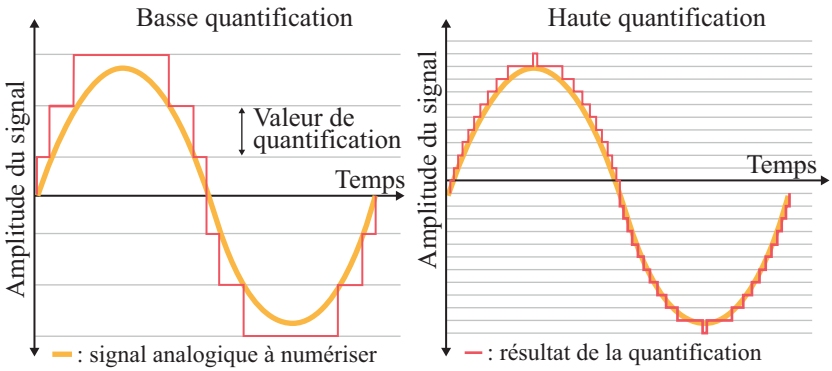
Avec 3 bits, il est possible de stocker 8 valeurs (000 001 010 011 100 101 110 et 111). Et ainsi de suite.

D'une manière générale, si n est un entier, avec n bits, on peut stocker 2^n valeurs.

Numériquement, il est impossible de coder toutes les valeurs qui peuvent être échantillonnées. On ne pourra stocker que la valeur possible la plus proche. La figure page suivante montre un exemple de quantification du signal avec plus ou moins de bits.

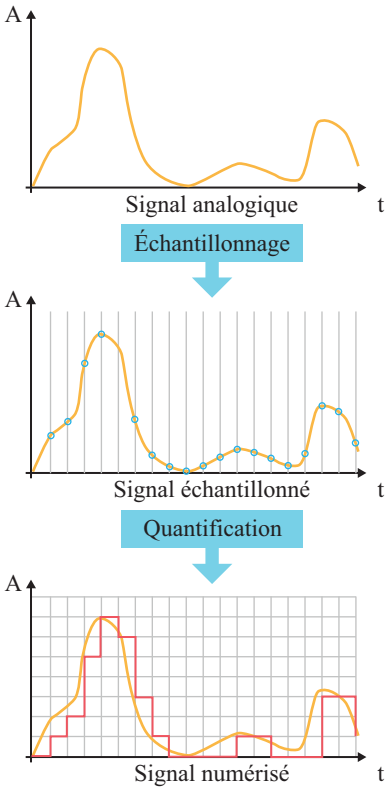
Voir graphiques page suivante.

COURS



Plus la quantification est grande, plus le signal sera reproduit avec précision.

Remarque : les différentes étapes de la numérisation ne se limitent pas aux signaux périodiques : elles s'appliquent à un signal quelconque.



À RETENIR

Le signal numérique est d'autant plus fidèle au signal d'entrée que la fréquence d'échantillonnage est grande et que le signal est quantifié avec grand nombre de bits.
Mais plus le signal numérisé est fidèle au signal d'entrée, plus il nécessitera une quantité de stockage importante et un temps de transfert élevé s'il faut déplacer le fichier. On choisit donc des paramètres adaptés en fonction de l'utilisation souhaitée.

Exemples de caractéristiques de numérisation :

- Son qualité téléphone : 8 000 Hz ; 8 bits
- Son qualité radio FM : 22 050 Hz ; 16 bits
- Son qualité CD : 44 100 Hz ; 16 bits
- Son qualité DVD : 48 000 Hz ; 24 bits
- Son audio professionnel : entre 96 000 et 192 000 Hz ; 24 et 32 bits

2 Taille d'un fichier audio

2.1 Fichier audio non compressé

La taille d'un fichier numérique, c'est-à-dire la quantité de mémoire qu'il occupera sur un espace de stockage numérique (disque dur, carte mémoire, cloud, etc.) va dépendre des choix qui ont été faits lors de la numérisation ainsi que de la méthode de codage de l'information choisie.

La taille d'un fichier s'exprime généralement :

- en octet (1 octet = 8 bits),
- en kilo-octet (1 ko = 1 000 octets),
- en méga-octet (1 Mo = 10^6 octets),
- en giga-octet (1 Go = 10^9 octets),
- et en tera-octet (1 To = 10^{12} octets).

Remarque : le kilo-octet correspond bien à 1 000 octets et non à 1 024 octets comme certains le pensent. Il existe un autre préfixe pour désigner 1 024 octets : le kibi-octet, noté Kio (1 Kio = 1 024 octets).

Pour calculer la taille d'un fichier audio de durée t (exprimée en secondes), il faut donc savoir comment il a été numérisé et raisonner en plusieurs étapes :

- 1) Calcul du nombre d'échantillons.
  La fréquence d'échantillonnage correspond au nombre d'échantillons par seconde. Le nombre total d'échantillons est donc $Nb_{\text{échantillons}} = f_E \times t$.
- 2) Calcul de la taille du fichier en bits.
  Chaque échantillon est codé sur un certain nombre de bits que l'on notera Q. La taille du fichier (en bits) sera donc
  $$N_{\text{bits}} = Q \times Nb_{\text{échantillons}} = Q \times f_E \times t.$$
- 3) Conversion de cette taille en octet.
  Un octet correspond à 8 bits. On obtient donc la taille en octets du fichier N en divisant N_{bits} par 8.
  $$N = \frac{Q \times f_E \times t}{8}.$$
- 4) Prise en compte du nombre de voies.
  Lorsque le son est codé en stéréo, il faut en fait coder deux voies (une pour « l'oreille droite » et une pour « l'oreille gauche »). La taille finale du fichier est alors deux fois plus grande que la taille calculée précédemment. On obtient ainsi une formule générale pour la taille d'un fichier qui prend en compte le nombre de voies n.

COURS

On retiendra donc que :

$$N = \frac{Q \times f_E \times t}{8} \times n.$$

où :

- N représente la taille du fichier en octets ;
- f_E, la fréquence d'échantillonnage en Hz ;
- Q, la quantification en bits ;
- t, la durée du signal audio en s ;
- n, le nombre de voies (mono : 1 voie ; stéréo : 2 voies).

Le tableau de la page suivante donne quelques exemples de tailles de fichiers audio suivant l'échantillonnage et la quantification :

	Échantillonnage	Quantification	Taille du fichier
Fichier mono de 2,48 s	96 000	32 bits	$N = 96\,000 \times \frac{32}{8} \times 2{,}48 \times 1$ $N = 952\,320$ octets $= 952$ ko
	96 000	16 bits	$N = 96\,000 \times \frac{16}{8} \times 2{,}48 \times 1$ $N = 476\,160$ octets $= 476$ ko
	44 100	16 bits	$N = 44\,100 \times \frac{16}{8} \times 2{,}48 \times 1$ $N = 218\,736$ octets $= 219$ ko

3 Compression d'un fichier audio

Le principe de la compression est de réduire la taille du fichier tout en restant fidèle au son, afin de faciliter le stockage et la transmission du signal audio.

Deux méthodes possibles :

- soit en supprimant les échantillons successifs identiques ;
- soit, comme dans le cas du MP3, en supprimant les fréquences inaudibles du signal.

Écoutez un morceau de musique avec plusieurs compressions différentes avec lilive!

Ce format est très répandu actuellement, bien que ce soit un format de compression avec pertes (il est impossible de retrouver le fichier non compressé à partir du fichier MP3).

Il existe également des techniques de compression sans perte (comme le format FLAC par exemple). Il est alors possible de retrouver le fichier initial en cas de besoin.

Le *taux de compression* est le rapport entre la taille du fichier compressé et le fichier original non compressé.

$$\tau = \frac{\text{taille initiale} - \text{taille finale}}{\text{taille initiale}} \times 100\ \%.$$

La formule peut aussi être exprimée de cette manière :

$$t = 1 - \frac{N_f}{N_i},$$

où N_f est le nombre de bits après compression et N_i le nombre de bits avant compression.

Plus un fichier est compressé, plus il pourra être stocké et transmis facilement, mais plus sa qualité sera faible. Il faut donc faire un compromis entre qualité et stockage/transmission.

Voir exercice 5 page 304.

À RETENIR

La compression d'un fichier audio consiste à réduire la taille pour faciliter le stockage ou la transmission. Le taux de compression est le pourcentage de compression entre le fichier initial et le fichier final.

	Taille du fichier	Taux de compression
Fichier original WAV	216 ko	0 %
Fichier compressé MP3	16 ko	92 %
Fichier compressé FLAC	93 ko	57 %

Tableau 13.1 – Taux de compression suivant les formats audio

INTERROS

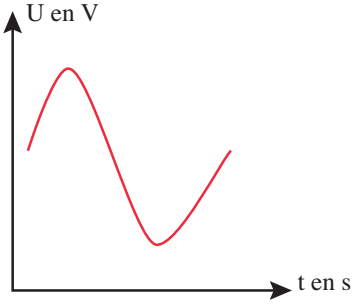
1 QCM Vérification des connaissances

10 min Corrigé p. 306

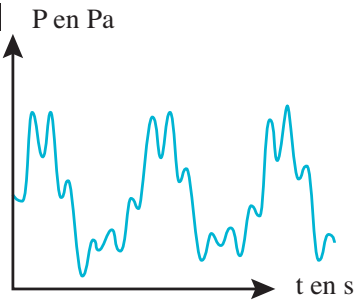
Choisissez la (ou les) réponse(s) exacte(s).

1 Repérer les représentations analogiques

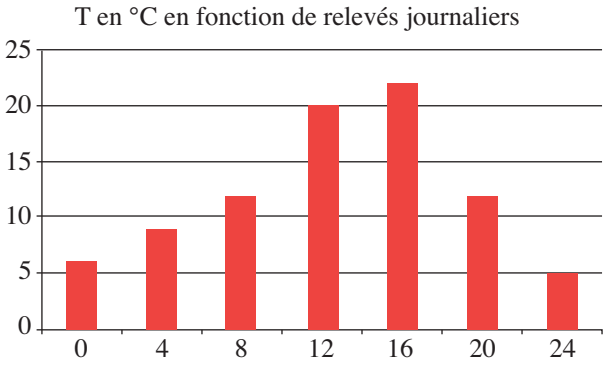
a



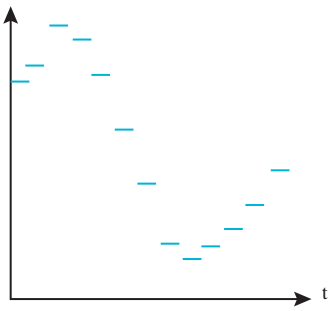
b



c



d



2 Plus la quantification est élevée :

a plus le son est fort ;

b plus la variation de volume du son est possible ;

c plus le son est fidèle au signal d'entrée ;

d plus le son est infidèle au signal d'entrée.

3 Plus la période d'échantillonnage est élevée :

a plus le son est fort ;

b plus le son est faible ;

c plus le son est fidèle au signal d'entrée ;

d moins le son est fidèle au signal d'entrée.

4 La numérisation d'un signal fidèle à la source nécessite :

a Une fréquence d'échantillonnage équivalente au moins à la moitié de la fondamentale d'entrée ;

b Une fréquence d'échantillonnage équivalente au double de celle de la fondamentale d'entrée ;

c Une fréquence d'échantillonnage équivalente au moins au double de la fréquence maximale présente dans le signal d'entrée ;

d Une fréquence d'échantillonnage équivalente au moins au tiers de la fréquence maximale présente dans le signal d'entrée.

5 La compression d'un fichier audio :

a augmente le temps de transmission ;

b facilite la transmission ;

c perds forcément des données ;

d peut s'exprimer par un pourcentage de diminution du fichier original.

6 Un fichier audio de 2 minutes est enregistré sur un CD avec les caractéristiques usuelles : 44 kHz, 16 bits et en stéréo, il occupe un espace de stockage de :

a 1,4 Mo ;

b 3,4 Mo ;

c 21,12 Mo ;

d 8,5 Mo.

2 Fréquence d'échantillonnage

★ 15 min Corrigé p. 306

Lycée Chaptal, Paris

Le graphique suivant est une représentation d'un signal audio échantillonné en amplitude relative en fonction du temps en ms.

INTERROS

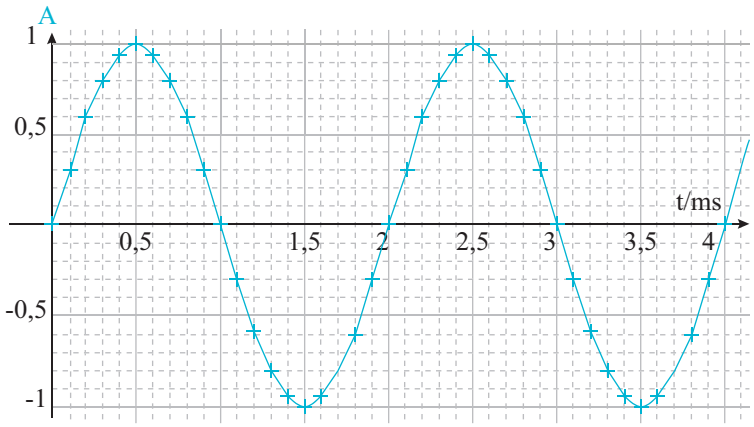


Figure 13.5

1. S'agit-il d'un son pur ? Justifier.
2. Déterminer la fréquence du signal.
3. Ce signal est-il audible ? Justifier.
4. Définir la notion de fréquence d'échantillonnage.
5. Déterminer la fréquence d'échantillonnage du signal audio.
6. L'échantillonnage permet-il d'obtenir un signal de sortie fidèle ?
7. Comment faut-il procéder pour améliorer la numérisation ? Justifier.
8. Nommer la 2e étape de numérisation d'un signal audio.
9. Expliquer le rôle de cette 2e étape.

3 Des signaux fidèles au signal d'entrée ★ 10 min Corrigé p. 307

Lycée Chaptal, Paris

Un piano jouant une note a été enregistré avec des fréquences d'échantillonnage différentes.

Voir illustration page suivante.

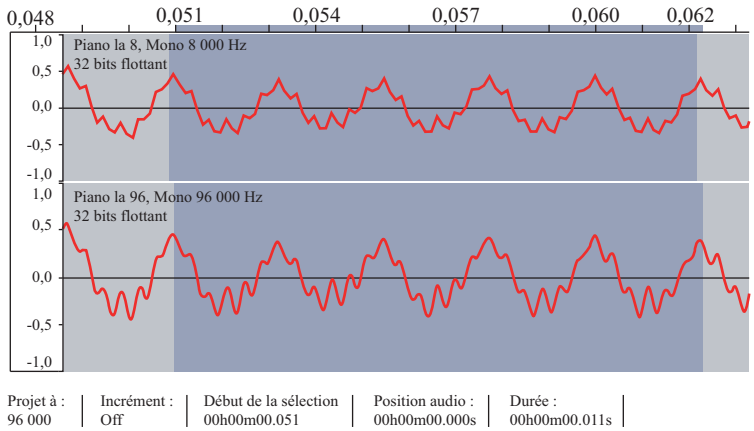


Figure 13.6 – Signaux d'un enregistrement de piano

1. Relever la fréquence d'échantillonnage de chacun des signaux précédents.
2. Expliquer comment on peut voir que le 2e signal a une fréquence d'échantillonnage supérieure au 1er signal.
3. Décrire la nature du son du piano.
4. Déterminer la fréquence fondamentale du son.

4 Compression MP3

★★ 10 min Corrigé p. 308

Lycée Clémenceau, Nantes

Éléonore décide d'extraire une piste audio d'un des CD de ses parents pour le compresser au format MP3.

L'enregistrement d'origine est effectué avec une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz et une quantification de 16 bits sur deux canaux.

La chanson qu'elle souhaite extraire dure 2 minutes et 30 secondes.

1. Justifier le choix de la fréquence d'échantillonnage pour un CD.
2. Donner le nombre de valeurs possible pour la quantification de la piste sur le CD.
3. Calculer la taille du fichier audio sur le CD.
4. Une fois extrait et compressé, Éléonore récupère un fichier de 2,28 Mo. Vérifier que le taux de compression est proche de de $r = 91$ %.

5 Optimisation du stockage

★★★ 30 min Corrigé p. 308

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Depuis plusieurs années, le stockage de données ne cesse d'évoluer, des premières clés USB qui supportaient quelques méga-octets, aux disques durs de plusieurs téra-octets. Aujourd'hui, nous pouvons transporter des heures de fichiers multimédias.

Voici quelques caractéristiques de diverses clés USB du marché.

	USB 1.0	**USB 2.0**	**USB 3.0**
Débit	0,19 Mo/s	60 Mo/s	600 Mo/s

	Clé USB A	Clé USB B
Capacité	32 Go	32 Go
Interface	USB 2.0	USB 3.0
Prix	10 euros	15 euros

Voici les caractéristiques de fichiers audio obtenus à partir du même signal de 2,5 secondes.

Nom du fichier	**Type**	**Durée**	**Taille**	**Taux d'échantionnage**
La_mono_44_16.flac	Audio FLAC	00:00:02	93 ko	376 kbit/s
La_mono_44_16.mp3	Fichier MP3	00:00:02	16 ko	48 kbit/s
La_mono_44_16.wav	WAV Audio File	00:00:02	216 ko	705 kbit/s
La_mono_96_8.wav	WAV Audio File	00:00:02	235 ko	768 kbit/s
La_mono_96_16.wav	WAV Audio File	00:00:02	469 ko	1 536 kbit/s
La_mono_96_32.wav	WAV Audio File	00:00:02	930 ko	3 072 kbit/s
La_stereo_96_32.wav	WAV Audio File	00:00:02	1 873 ko	6 144 kbit/s

Attention, les Ko donnés dans les propriétés informatiques correspondent à des kibioctets et non à des kilo-octets qui seraient notés ko.

Pour éviter les confusions, on recommande de noter Kio au lieu de Ko pour désigner les kibioctets.

Ainsi, 1 ko = 1 000 octets et 1 Kio = 1 024 octets. Cette unité, apparue en 1998 pour permettre d'uniformiser les multiples et les sous-multiples de toutes les unités, reflète le caractère binaire du langage informatique.

Unités de capacité de mémoire informatique :

- 1 kibioctet (Kio) = 2^{10} octets= 1 024 octets
- 1 mébioctet (Mio) = 2^{20} octets = 1 048 576 octets
- 1 gibioctet (Gio) = 2^{30} octets = 1 073 741 824 octets
- 1 tébioctet (Tio) = 2^{40} octets = 1 099 511 627 776 octets
- 1 kilo-octet (ko) = 1 000 octets
- 1 méga-octet (Mo) = 1 000 000 octets
- 1 giga-octet (Go) = 1 000 000 000 octets
- 1 tera-octet (To) = 1 000 000 000 000 octets

1 Relever la taille du fichier *La_mono_96_32.wav* et l'exprimer en Kio.

2 Relever la vitesse de transmission (ou débit) du fichier *La_mono_96_32.wav* en kbit/s.

3 Trouver une relation qui permet de calculer le taux d'échantillonnage à partir des autres données.

4 Vérifier la taille du fichier *La_mono_44_16.wav*.

5 Expliquer comment on peut prévoir que le fichier *La_stereo_96_32.wav* est enregistré en stéréo.

6 Calculer le taux de compression pour les 2 fichiers compressés par rapport au fichier original *La_mono_44_16.wav*.

7 Rappeler sur quelle caractéristique du signal s'appuie le format MP3 pour compresser le fichier.

8 Calculer le temps audio, en heures, au format MP3 que l'on peut stocker sur chacune des clés USB, si on a utilisé les mêmes paramètres de compression que pour le fichier de 2,5 s.

9 Calculer le temps de transfert pour remplir chacune des clés USB.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 300

1 Les représentations analogiques sont les représentations **a** et **b**.

2 Réponse **c**.

3 Plus la période d'échantillonnage est élevée, plus la fréquence d'échantillonnage est faible. Réponse **d**.

4 Réponse **c**.

5 Réponses **b** et **d**.

6

$$N = f_E \times \frac{Q}{8} \times t \times n = 44\,000 \text{ Hz} \times \frac{16 \text{ bits}}{8} \times 2 \times 60 \text{ s} \times 2.$$

$N = 2{,}11.10^7$ octets soit 21,12 Mo. Réponse **c**.

2 Fréquence d'échantillonnage

Enoncé p. 301

Lycée Chaptal, Paris

Voici la représentation d'un signal audio échantillonné en amplitude relative en fonction du temps en ms.

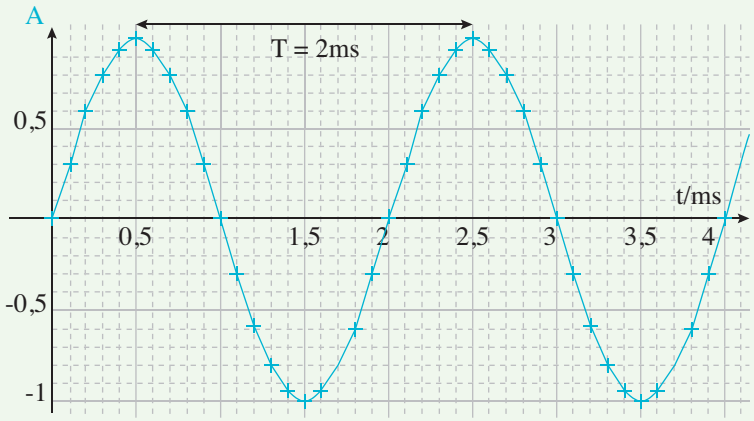


Figure 13.7

1 On observe que le signal est sinusoïdal, donc le son est pur.

2 $T = 2$ ms donc :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.10^{-3} \text{ s}} = 500 \text{ Hz}.$$

3 $f = 500$ Hz. La valeur de f est comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz donc le son est audible.

4 La fréquence d'échantillonnage en hertz correspond au nombre d'échantillons par seconde.

5 D'après le graphique, il y a un point toutes les 0,1 ms. La fréquence d'échantillonnage est donc :

$$f_e = \frac{1}{0{,}1.10^{-3}\ \text{s}} = 10\,000\ \text{Hz}.$$

6 La fréquence d'échantillonnage est supérieure au double de la fréquence du signal, donc l'échantillonnage est fidèle au signal d'entrée.

7 Pour améliorer la numérisation, on peut augmenter la fréquence d'échantillonnage.

8 La deuxième étape de numérisation d'un signal audio est la quantification.

9 Son rôle est de traduire l'amplitude de chaque échantillon en langage binaire. Donc plus le nombre de bits sera important, plus le signal numérique sera fidèle au signal analogique.

3 Des signaux fidèles au signal d'entrée

Enoncé p. 302

Lycée Chaptal, Paris

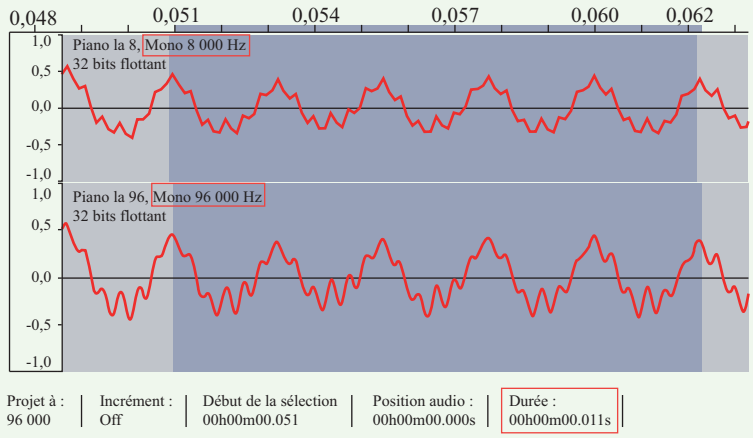


Figure 13.8

1 La fréquence d'échantillonnage du premier signal est de 8 000 Hz et celle du deuxième signal est de 96 000 Hz.

2 On observe que la courbe du deuxième signal est très lisse, on ne distingue pas les points d'échantillonnage contrairement au premier signal. Donc la fréquence d'échantillonnage du deuxième signal est supérieure à celle du premier signal.

3 Le son du piano est périodique avec de nombreux creux et bosses donc ce n'est pas un simple signal sinusoïdal. Il est constitué de plusieurs fréquences, c'est donc un son composé. Le piano possède de nombreuses harmoniques.

4 La sélection du signal (en gris) recouvre cinq périodes dont la durée est de 0,011 s donc

$$T = \frac{0{,}011\text{ s}}{5} = 2{,}2.10^{-3}\text{ s} \Longrightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}2.10^{-3}}\text{ s} = 454\text{ Hz}.$$

4 Compression MP3

Enoncé p. 303

Lycée Clémenceau, Nantes

1 Pour le choix d'échantillonnage, on considère l'intervalle des fréquences audibles entre 20 Hz et 20 kHz. Donc pour que le son soit fidèle au signal analogique, il faut que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure à 40 kHz. Donc la fréquence d'échantillonnage d'un CD répond à ce critère.

2 La quantification permet de traduire l'amplitude en signal binaire, nombre en base 2. Dans notre cas, elle se fait sur 16 bits donc il y a 2^{16} valeurs soit 65 536 valeurs.

3 $N = f_E \times \frac{Q}{8} \times t \times n = 44\,100\text{ Hz} \times \frac{16\text{ bits}}{8} \times (2 \times 60 + 30)\text{ s} \times 2$

$N = 2{,}65 \times 10^7$ octets soit 26,5 Mo.

4 $\tau = \frac{\text{taille initiale} - \text{taille finale}}{\text{taille initiale}} \times 100\,\%$

$= \frac{26{,}5\text{ Mo} - 2{,}28\text{ Mo}}{26{,}5\text{ Mo}} \times 100\,\% = 91{,}4\,\%$

$\tau = 91{,}4\,\%$ donc c'est cohérent avec le résultat attendu

5 Optimisation du stockage

Enoncé p. 304

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

1 La taille du fichier *La_mono_96_32.wav* est de 930 ko soit 930 000 octets. Or 1 Kio = 1 024 octets. Donc pour obtenir la taille en Kio, il faut diviser la taille en octets par 1 024. Donc la taille du fichier est égale à $\frac{930\,000}{1\,024} = 908$ Kio.

2 Le taux d'échantillonnage du fichier *La_mono_96_32.wav* est de 3 072 kbit/s.

3 Le taux d'échantillonnage D est lié à la durée t du fichier et à sa taille N par la relation : $D = \frac{N}{t}$.

4 La durée du fichier est $t = 2{,}5$ s.
Son taux d'échantillonnage est $D = 705$ kbis/s. Donc la taille N du fichier est :

$$N = D \times t = 705 \times 2{,}5 = 1\,762 \text{ kbit.}$$

Pour obtenir sa taille en octet, il faut diviser par 8, d'où :

$$N = \frac{1\,762}{8} = 220{,}31 \text{ ko.}$$

On trouve une valeur très proche de la valeur annoncée de 221 ko. La différence peut être due au fait qu'en plus de la piste sonore, un fichier contient toujours des métadonnées.

5 Un fichier « mono » ne contient qu'une seule voie. Un fichier « stéréo » en contient deux.
Comme le fichier *La_stereo_96_32.wav* a une taille deux fois plus grande que le fichier *La_mono_96_32.wav* (dont on sait est encodé en « mono ») alors qu'ils font la même durée et qu'ils ont été numérisés avec les mêmes paramètres, c'est que le fichier *La_stereo_96_32.wav* contient deux voies. c'est donc un fichier « stéréo ».

6 Taux de compression du fichier *La_mono_44_16.flac*

$$\tau = \frac{\text{taille initiale} - \text{taille finale}}{\text{taille initiale}} \times 100\ \%,$$
$$= \frac{216 \text{ ko} - 93 \text{ ko}}{216 \text{ ko}} \times 100\ \% = 57\ \%.$$

Taux de compression du fichier *La_mono_44_16.mp3*

$$\tau = \frac{\text{taille initiale} - \text{taille finale}}{\text{taille initiale}} \times 100\ \%,$$
$$= \frac{216 \text{ ko} - 16 \text{ ko}}{216 \text{ ko}} \times 100\ \% = 93\ \%.$$

7 Le format MP3 supprime les fréquences inaudibles du signal, en particulier celles supérieures à 20 kHz.

8 D'après les données, on sait qu'un fichier MP3 d'un signal audio de 2,5 s occupe 16 ko.

Temps en s	Taille en octets
2,5 s	16 000
t	32×10^9 (capacité des clés USB)

Donc :

$$t = \frac{2{,}5 \text{ s} \times 32.10^9 \text{ o}}{16\,000 \text{ o}} = 5.10^6 \text{ s}$$

soit en heures :

$$t = \frac{5.10^6 \text{ s}}{3\,600} = 1\,389 \text{ h.}$$

9 Le débit de transfert D s'exprime en Mo/s. C'est donc le nombre de Mo stockés par seconde. Pour calculer le temps nécessaire au remplissage des clés USB, on applique la formule :

$$D = \frac{N}{t} \implies t = \frac{N}{D}.$$

La capacité de stockage pour nos 2 clés USB est 32 Go soit

$$N = 32\,000 \text{ Mo}.$$

	Clé USB A	Clé USB B
Capacité	32 Go	32 Go
Interface	USB 2.0	USB 3.0
Débit, D	60 Mo/s	600 Mo/s
t	533 s $\sim$ 10 min	53 s $<$ 1 min

Chapitre 14

Entendre la musique

Plan du chapitre

1. Introduction
2. Du son au message nerveux électrique
3. L'oreille, un organe sensible
4. Entendre, une construction cérébrale

1 Introduction

L'oreille est l'organe qui nous permet d'avoir des informations sonores sur l'environnement qui nous entoure. Comme tout organe, celle-ci peut subir des dommages et présenter des dysfonctionnements. De plus, pour un même morceau de musique, nous ne ressentons pas tous les mêmes sensations et n'avons pas forcément la même perception du morceau entendu.

PROBLÉMATIQUE

Comment entend-on et comment se crée la perception sonore ?

2 Du son au message nerveux électrique

2.1 Organisation anatomique de l'organe auditif

Les ondes sonores se propagent dans les trois parties de l'oreille humaine (externe puis moyenne puis interne) avant d'être transformées en messages nerveux électriques que le cerveau peut interpréter.

Voir schéma page suivante.

COURS

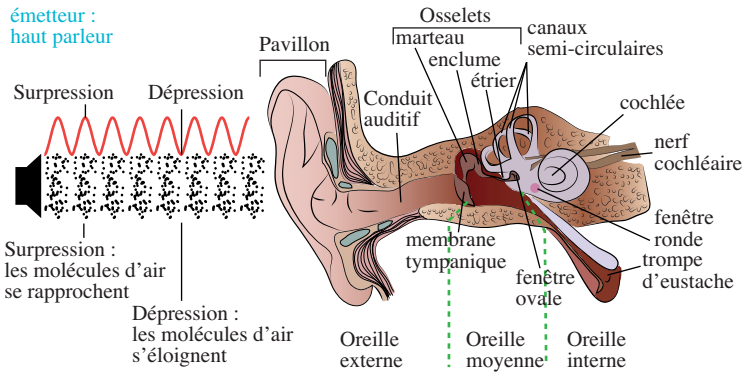


Figure 14.1 – Organisation de l'oreille humaine

Le *pavillon*, grâce à sa forme, canalise les sons vers le conduit auditif externe. Ces deux éléments forment l'oreille externe. Au fond du conduit auditif externe, le *tympan* est une fine membrane en forme de cône aplati. Cette membrane se met à vibrer à la même fréquence que les ondes sonores. Les sons graves le font vibrer à basse fréquence et les sons aigus le font vibrer à haute fréquence.

Ces vibrations sont transmises en amplitude et en fréquence à une chaîne de trois osselets mobiles (marteau, enclume, étrier) qui se percutent successivement. Ces osselets font partie de l'oreille moyenne. Ils permettent de transmettre et d'amplifier les ondes sonores. L'étrier (dernier des osselets), qui agit comme un piston, fait ensuite vibrer la fenêtre ovale de la cochlée (*oreille interne*). La pression exercée sur la fenêtre ovale par l'étrier est 20 fois plus forte que sur le tympan, ce qui limite la perte auditive lors du passage de l'onde sonore de l'air à un milieu liquide.

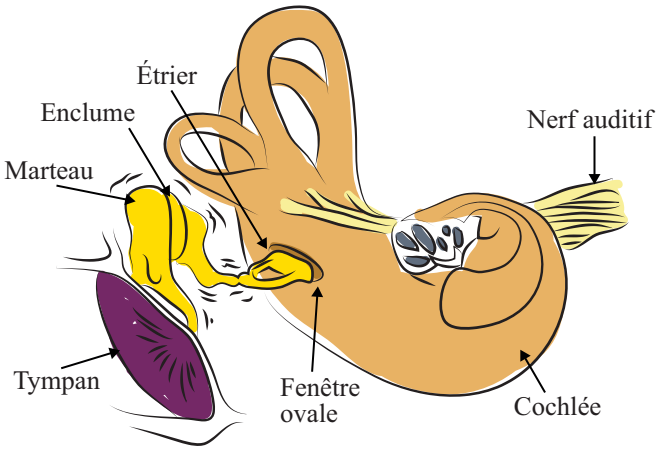


Figure 14.2 – Organisation de l'oreille moyenne et interne

À RETENIR

L'oreille externe canalise et amplifie les sons du milieu extérieur vers le tympan. Cette membrane vibrante transmet les vibrations de l'air jusqu'à la cochlée de l'oreille interne grâce aux osselets.

2.2 La production d'un message nerveux auditif

La *cochlée* (du grec « *cochlea* » signifiant limaçon/escargot) est un organe spiralé constitué de trois petits canaux remplis de liquide. Dans la cochlée, se trouve l'*organe de Corti*, constitué de rangées de cellules ciliées, dont la parte supérieure porte une centaine de cils vibratiles en contact avec le milieu liquide et dont la partie inférieure est en lien avec les fibres nerveuses qui constituent le nerf cochléaire. L'organe de Corti repose sur la membrane basilaire qui est flexible. Les vibrations issues des osselets mettent en mouvement le liquide cochléaire, ce qui fait bouger la membrane basilaire et donc les cils vibratiles des cellules ciliées, activant les fibres nerveuses. Le message nerveux est constitué de signaux électriques, appelés *potentiels d'action*, correspondant à de brèves modifications de l'état électrique de la fibre nerveuse. Si l'intensité sonore est plus importante, le nombre de potentiels d'actions (fréquence) sera plus important.

Du fait de son organisation, les différents points de la membrane basilaire ne vibrent pas par les mêmes fréquences sonores.

En fait, si la fréquence de la vibration produite par l'étrier et celle des cellules ciliées coïncide, il y a *résonance* entre les deux et une très forte amplification de la vibration se produit.

La membrane basilaire étant de largeur et de souplesse différente de l'étrier vers l'apex, il s'en suit qu'une zone spécifique de cette membrane entre en résonance à une fréquence donnée. Comme on le voit sur la figure 14.3, la déformation est maximale à des endroits différents selon la fréquence des ondes reçues. Ainsi, les sons aigus à partir de 20 000 Hz font plus vibrer la base de la membrane basilaire, alors que les sons graves jusqu'à 20 Hz la font plus vibrer au niveau de l'apex. Notre oreille est ainsi sensible à des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz.

Voir schéma page suivante.

COURS

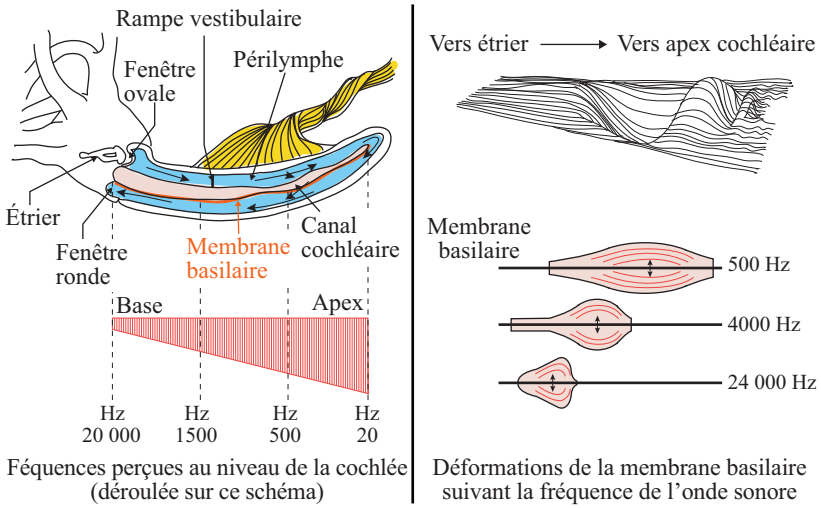


Figure 14.3 – Cochlée et vibrations sonores

À RETENIR

Les vibrations transmises à la cochlée stimulent l'organe de Corti de la membrane basilaire du canal cochléaire dans l'oreille interne à des endroits différents selon la fréquence sonore. Les sons audibles pour les humains ont des fréquences comprises entre 20 et 20 000 Hz, du fait de l'organisation de la cochlée.

Retrouvez le système auditif humain expliqué en vidéo avec live!

3 L'oreille, un organe sensible

3.1 Notion de champ auditif

Pour être audible, il ne suffit pas que l'onde ait une fréquence comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz. Cela dépend aussi de son intensité. Les cellules ciliées sont sensibles à des intensités comprises en moyenne entre 20 et 120 dB, la voix humaine étant comprise entre 20 et 60 dB.

On peut tracer le champ auditif sur un graphique indiquant l'intensité sonore (en dB) en fonction de la fréquence sonore (en Hz).

Voir graphique page suivante.

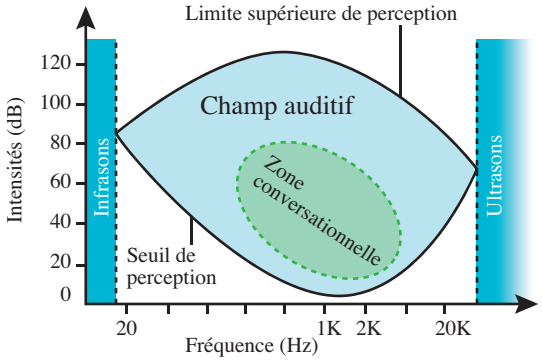


Figure 14.4 – Champ auditif humain

Voir exercices 3 page 319, 6 page 322, 7 page 322, 8 page 324 et 9 page 325.

3.2 Troubles auditifs

L'oreille est un organe sensible. De 85 dB à 105 dB, le son est nocif. Au-delà de 110 dB, un son devient intolérable et peut dégrader rapidement l'audition. Si le son est supérieur à 120 dB, il y a des risques de dysfonctionnements ou de pertes auditives irréversibles. Il suffit parfois de quelques secondes au-delà de 120 dB comme on le voit dans la figure ci-dessous.

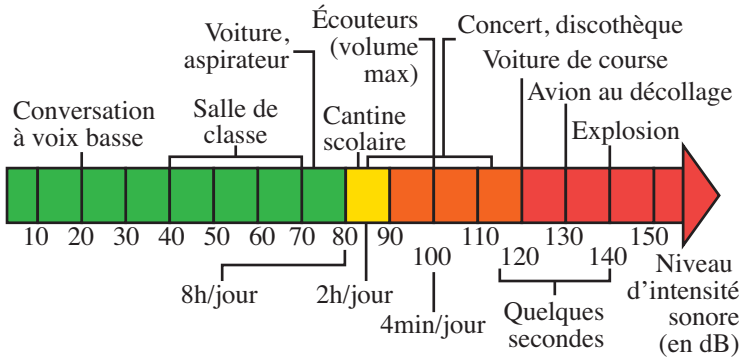


Figure 14.5 – Des risques associés à des activités du quotidien

Les troubles auditifs dont on peut souffrir au cours de sa vie (hors surdité de naissance) sont divers : acouphènes, hyperacousie, presbyacousie, surdité totale ou partielle etc.

3.3 Les cellules ciliées, un capital précieux

Nous disposons d'un stock d'environ 16 000 cellules ciliées. Mais ces cellules

et leurs cils vibratiles sont fragiles et facilement endommagés par des sons trop intenses. Une durée d'exposition trop longue à de tels sons peut perturber le fonctionnement de l'oreille et provoquer des acouphènes voire mener à la surdité. Si l'intensité sonore est très élevée, l'amplitude de vibration des cellules ciliées est telle que les cils peuvent se casser. Si le traumatisme sonore dure trop longtemps, cela peut même aboutir à la destruction des cellules ciliées. Or les cils et cellules ne peuvent se renouveler une fois détruits. Il s'agit donc d'un capital précieux qu'il faut préserver grâce à une bonne hygiène de vie au quotidien et le respect des conditions de sécurité dans le monde du travail.

À RETENIR

L'oreille humaine est sensible à des sons d'intensité inférieure à 120 dB et de fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz. La gamme de sons perceptibles correspond au champ auditif qui est défini par les intensités maximale et minimale pour chaque fréquence sonore audible. Au-delà de 80 dB, notre oreille encourt un risque de dysfonctionnement et au-delà de 120 dB en quelques secondes, les dégâts sont potentiellement irréversibles. Les cellules ciliées et les cils vibratiles sont des structures fragiles et facilement endommagées par des sons trop intenses. Les dégâts peuvent être irréversibles et causer des troubles auditifs dont la surdité partielle ou totale.

Voir exercice 5 page 5.

4 Entendre, une construction cérébrale

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une technique d'imagerie médicale permettant d'obtenir des images anatomiques (IRMa) en noir et blanc, et en 3D, selon trois plans de coupe. L'I.R.M. fonctionnelle (IRMf) permet de mesurer *in vivo* l'activité cérébrale. Grâce à cette technique, les scientifiques ont pu mieux comprendre le fonctionnement des aires cérébrales impliquées dans l'audition.

Le message nerveux auditif élaboré au niveau de la cochlée est véhiculé par des fibres nerveuses jusqu'à certaines régions du cerveau : le cortex auditif. Le cortex auditif primaire localisé dans le lobe temporal du cerveau est la première région à recevoir un message nerveux auditif. Il est responsable des sensations de hauteur, d'intensité, de localisation et de rythme du son. Il distingue les fréquences, l'intensité ou encore la durée. La fonction qui identifie la hauteur et la fréquence de chaque note de musique semble plus prédominante du côté droit du cerveau. Le cortex auditif primaire fait un traitement élémentaire qui correspond à la sensation sonore.

D'autres structures cérébrales supplémentaires interviennent. La mélodie est perçue dans le cortex auditif secondaire ou d'association auditive. Il permet un traitement auditif de plus haut niveau en distinguant parole, musique ou encore bruit.

Il détecte aussi les fausses notes. Le rythme est quant à lui perçu par le cortex auditif secondaire du côté droit du cerveau. Cette activité est donc bien plus complexe qu'une simple perception. Par ailleurs, d'autres zones cérébrales intervenant dans la mémoire ou encore les émotions, peuvent interagir avec le traitement de l'information sonore. Ainsi naît une perception sonore consciente.

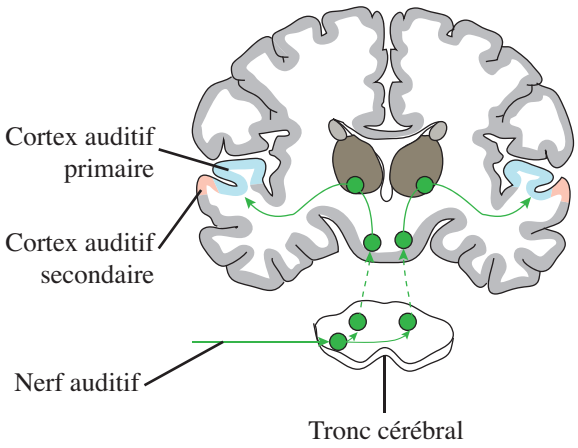


Figure 14.6 – Localisation des cortex auditifs primaires et secondaires

À RETENIR

Le cortex auditif reçoit et traite les informations auditives provenant de l'oreille interne. Certaines aires cérébrales permettent, après apprentissage, l'interprétation de l'univers sonore (parole, voix, musique etc.) en établissant des connexions avec d'autres aires pouvant intervenir dans la mémoire ou les émotions.

INTERROS

1 QCM Vérification des connaissances

5 min

Corrigé p. 330

Entourez la bonne réponse.

1 Dans l'oreille humaine :

a il y 3 parties qui sont du pavillon vers la cochlée : oreille interne, moyenne et externe ;

b la fenêtre ovale est entre l'oreille moyenne et interne ;

c le tympan est entre l'oreille moyenne et interne ;

d les 4 osselets sont dans l'oreille moyenne.

2 Les osselets servent à :

a transmettre les vibrations sonores à l'oreille moyenne ;

b transmettre les vibrations sonores à l'oreille interne ;

c convertir le signal mécanique en signal électrique ;

d transmettre le signal électrique.

3 Les cellules ciliées servent à :

a transmettre les vibrations sonores à l'oreille moyenne ;

b transmettre les vibrations sonores à l'oreille interne ;

c convertir le signal mécanique en signal électrique ;

d transmettre le signal nerveux.

4 L'altération des cellules ciliées :

a est toujours réversible ;

b est fréquente lors d'une écoute avec un niveau sonore > 120 dB ;

c entraîne toujours une surdité ;

d a lieu avec des fréquences < 20 Hz.

5 Les aires cérébrales auditives :

a sont situées dans le lobe frontal ;

b ne sont pas spécialisées, elles traitent tous les sons ;

c sont spécialisées, certaines traitent le rythme, d'autres le langage ;

d comportent des cellules ciliées.

2 Schéma à légender

★ 5 min Corrigé p. 330

Lycée Sainte Marie, Créteil

Légendez le système auditif pour les numéros de 1 à 10.

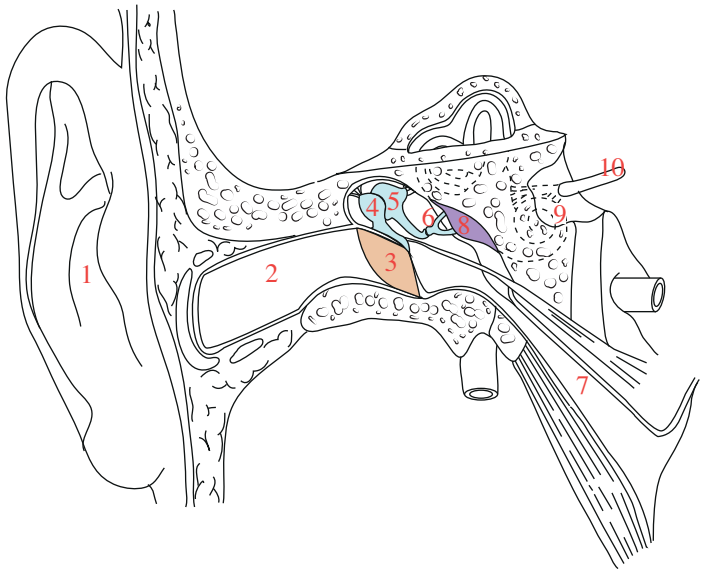


Figure 14.7 – Schéma de l'organisation de l'oreille humaine

3 Lien entre distance et niveau sonore

★ 10 min Corrigé p. 330

Lycée Pasteur, Neuilly

Sarah est en concert. Les enceintes au niveau de la scène diffusent la musique à un niveau sonore de 115 dB.

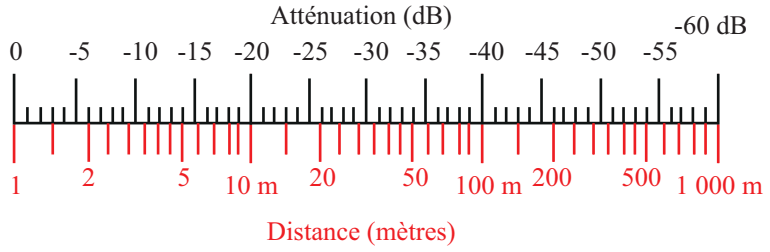


Figure 14.8 – Niveau sonore en fonction de la distance de la source

1 Citez la distance à laquelle on doit se placer pour éviter tout risque auditif en considérant qu'il commence vers 90 dB.

2 Les oreilles de Sarah risquent-elles d'avoir des problèmes si Sarah se place à 3 m ou 10 m de la scène ?

3 Précisez quels seraient les risques pour Sarah de s'approcher trop des enceintes en montant sur scène rejoindre son artiste préféré. On attend une explication au niveau biologique.

4 Perte d'intensité acoustique

★ 10 min Corrigé p. 331

Lycée Sophie Germain, Paris

Lorsqu'une onde sonore passe de l'air à un milieu liquide comme entre l'oreille moyenne et l'oreille interne, il y a une perte d'intensité acoustique. On cherche à calculer la perte d'intensité que subirait le son sans l'intervention amplificatrice des osselets.

Données : On peut calculer la « résistance acoustique » selon la formule

$$R = \sqrt{\rho \times E} \text{ (en U.S.I.)}$$

où ρ est la masse volumique et E est l'élasticité. On peut calculer le gain ou la perte d'intensité sonore avec la formule

$$l = 10 \times \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right),$$

où R_1 correspond au milieu d'origine, R_2 au milieu suivant et l a pour unité le dB.

	ρ (U.S.I)	E (U.S.I)
Air	1,2	$1{,}46.10^5$
Liquide de l'oreille interne	1 024	$2{,}53 \times 10^9$

Tableau 14.1 – Valeur de la masse volumique et de l'élasticité de l'air et du liquide de l'oreille interne

Calculer la perte d'intensité qui aurait lieu sans l'oreille moyenne.

5 Le plaisir d'écouter la musique

★ 15 min Corrigé p. 331

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

Document : Musique et cerveau

« Les messages nerveux produits par les cellules ciliées de la cochlée sont transmis au tronc cérébral, puis au cervelet. Quelques instants plus tard, le cortex auditif primaire est actif. Il est situé de part et d'autre de notre crâne, dans la partie supérieure du lobe temporal, pas très loin de nos oreilles. Il traite les messages nerveux de façon sommaire (hauteur et volume du son). Mais dès lors que l'on est en présence de musique, d'autres zones sont bientôt

sollicitées. L'imagerie d'IRM fonctionnelle montre ainsi que, si le son perçu possède un rythme, son analyse est réalisée dans les cortex frontal et pariétal et, de nouveau, dans le cervelet.

Les variations de la tonalité activent, outre l'incontournable cervelet, le cortex préfrontal, et de nombreuses régions du lobe temporal.

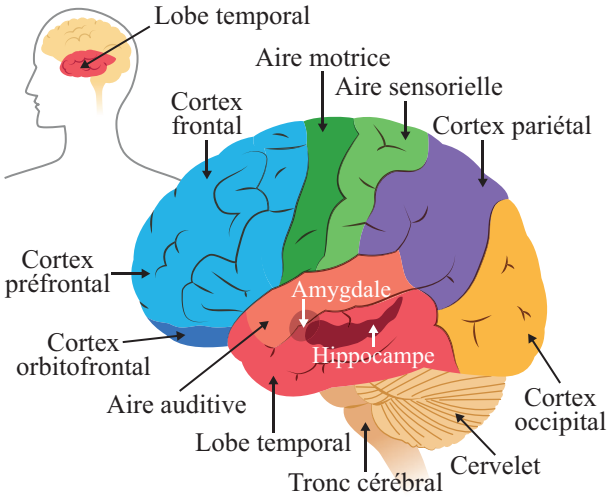
Si la musique que nous écoutons nous est connue, le cortex préfrontal devient actif, et un nouvel élément est mis à contribution : l'hippocampe, structure centrale de la mémoire.

Lorsque l'on fredonne une musique "dans sa tête", la plupart des zones activées lors d'une écoute réelle s'activent. Seul le cortex auditif est « en sommeil », tandis que le lobe frontal, est très actif.

Mais la musique, ce n'est pas que des rythmes et des tons. C'est aussi des émotions. Dès lors que nous ne sommes pas indifférents à ce que nous entendons, le cortex orbitofrontal (la partie à l'extrémité inférieure du cortex frontal, lieu clef du processus de récompense) et l'amygdale (évaluations des stimuli sensoriels, réponse à la peur, au plaisir…) sont parcourus spar de nombreux messages nerveux. »

D'après l'article rédigé le 20/02/2015 par Florian Gouthière.

https ://www.allodocteurs.fr/maladies/cerveau-et-neurologie/comment-le-cerveau-entend-il-la-musique_15642



En utilisant uniquement les données des documents, montrez que l'écoute de la musique fait intervenir plusieurs zones du cerveau.

6 La perception auditive

★★ 20 min Corrigé p. 332

Lycée Pasteur, Neuilly

1. À partir de vos connaissances, exposer les différentes étapes qui permettent la perception d'un son de l'oreille externe au cerveau.
2. Pour chacune des étapes, proposer une cause environnementale possible à l'origine d'une perte auditive.

7 Le réflexe stapédien

★★ 20 min Corrigé p. 332

Lycée La Bruyère, Versailles

Document 1 : le réflexe stapédien

« *Le réflexe stapédien, aussi appelé réflexe acoustique, chez l'Homme, est la contraction involontaire, du muscle stapédien (du latin stapia : étrier) situé dans l'oreille moyenne. En rendant plus rigide la chaîne des osselets, il atténue le niveau des sons transmis à l'oreille interne. L'application d'un son fort provoque ce réflexe bilatéral. Il agit sur les deux oreilles, même si le son fort n'est présenté qu'à une seule oreille. Le muscle stapédien se contracte aussi juste avant de commencer à parler.*

Le réflexe acoustique a trois fonctions principales. L'une d'elle est de protéger l'oreille interne, en atténuant la transmission des sons forts, surtout les graves.

Le seuil de déclenchement du réflexe acoustique (dit ART pour l'anglais « acoustic reflex threshold ») caractérise le stimulus qui active le réflexe acoustique. Il dépend de la fréquence et des individus. Pour les personnes avec audition normale, le seuil se situe de 70 à 100 dB SPL (voir illustration du document 2).

Chez l'Homme, dans la gamme des fréquences comprises entre 250 et 4 000 Hz, le seuil se situe environ 80 dB au-dessus du seuil d'audition.

Le seuil ART est en général de 10 à 20 dB inférieur au seuil d'inconfort. Cet inconfort n'est pas un indicateur fiable de la dangerosité d'un son. En effet, certaines personnes travaillant dans le bruit ont un niveau d'inconfort supérieur à la normale.

Les études ont prouvé la protection de l'organe de Corti par le réflexe acoustique face à une stimulation excessive, surtout pour les sons graves, puisque ce réflexe réduit de 15 dB une intensité sonore de 20 dB au-dessus du seuil de déclenchement du réflexe. Cependant les effets de cette protection sont limités.

[…] La tension du muscle chute d'environ 50 % de sa tension maximale après quelques secondes. Au déclenchement du réflexe stapédien, toute augmentation du son est atténuée. Une augmentation de niveau de 10 dB n'entraînera qu'une transmission majorée de 3 dB vers l'oreille interne. Cependant,

comme tous les muscles, le muscle stapédien se fatigue :

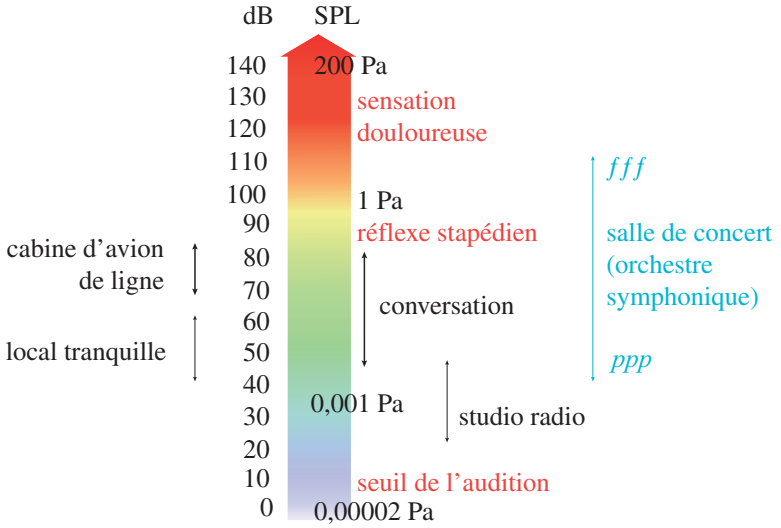
- *à 121 dB SPL, il lâche prise après 7 s. Ensuite l'oreille interne peut être irrémédiablement lésée ;*
- *à 109 dB SPL, il résiste environ 1 minute 52 secondes ;*
- *à 100 dB SPL, il résiste environ 15 minutes en moyenne.* »

D'après l'article « *Réflexe stapédien* » de l'encyclopédie libre Wikipédia.

Document 2 : échelle des décibels

En acoustique environnementale, on indique couramment le niveau du bruit en décibels. Cette valeur exprime le rapport de puissance entre la pression acoustique et une valeur de référence qui correspond à un son imperceptible.

La pression acoustique est la grandeur physique qui stimule l'audition humaine. La plage de pressions donnant un niveau sonore perceptible s'étale sur un rapport de 1 à plusieurs millions. La perception du volume sonore est approximativement logarithmique : une augmentation donnée du volume correspond à multiplier la pression par un facteur identique. Pour cette raison, la mesure de bruit convertit très généralement la pression acoustique en décibels. On obtient ainsi une échelle qui va de 0 à 140 dB et rarement plus.



1 À partir de l'étude des documents et de vos connaissances sur la fonction de l'oreille moyenne, exposer ce qu'est le réflexe stapédien.

2 Justifier l'intérêt de limiter à 100 dB les sorties casques des lecteurs MP3.

INTERROS

8 Perte d'audition de Monsieur X

★★ 15 min Corrigé p. 333

Lycée Montaigne, Bordeaux

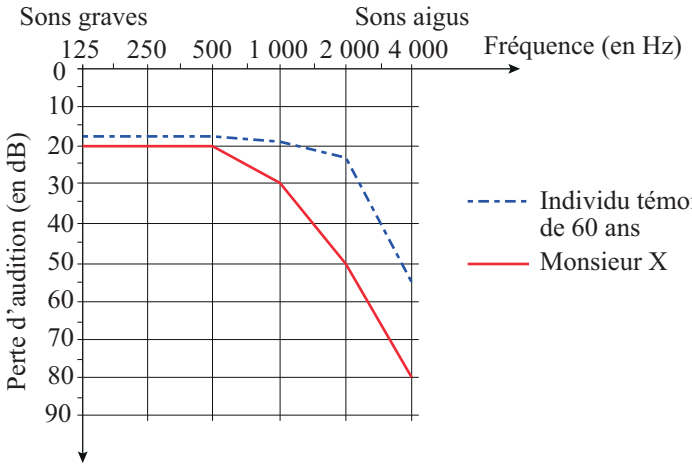
Monsieur X, chaudronnier âgé de 60 ans, consulte le médecin du travail pour réaliser un bilan de son audition. En utilisant les documents et vos connaissances, rédiger un texte argumenté expliquant la perte d'audition de M. X. Vous émettrez une hypothèse sur la raison de cette perte d'audition.

Document 1 : Tests d'audition réalisés chez un individu témoin et chez monsieur X

Le médecin réalise un audiogramme qui permet de mesurer une éventuelle perte d'audition. On mesure les pertes d'audition en décibels (dB) en fonction de la fréquence des sons.

Le résultat est présenté sur le graphique ci-dessous.

Si la perte d'audition est inférieure à 20 dB, l'audition est considérée comme normale.



Document 2 : Différents niveaux sonores et leurs effets

Les traumatismes sonores en milieu professionnel sont encore fréquents surtout lorsque le port de casque anti-bruit n'a pas toujours été respecté.

Voir graphique page suivante.

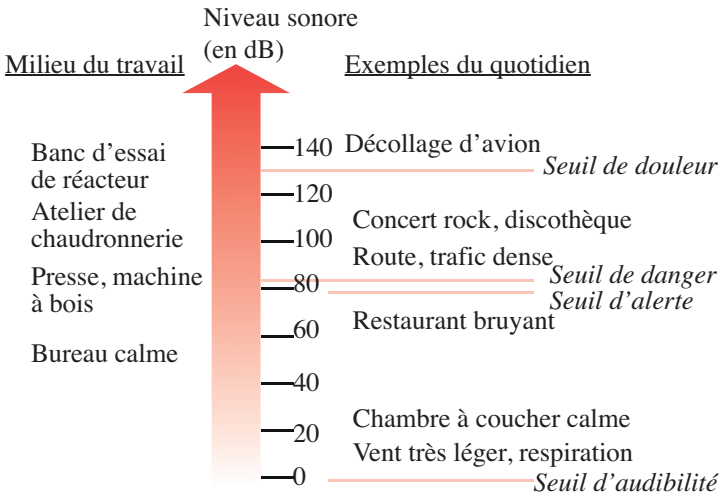
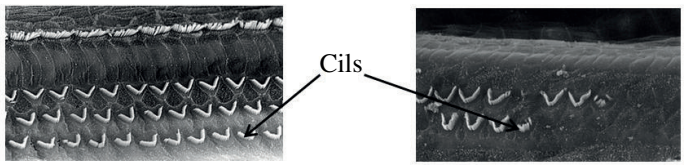


Figure 14.9 – Niveaux sonores. Source : d'après INRS, ED 962

Document 3 : Cellules ciliées

Les électronographies qui suivent montrent les cellules ciliées d'un individu à l'audition normale (à gauche) et de Monsieur X (à droite).



9 Conseils pour écouter la musique ★★ 15 min Corrigé p. 334

Lycée La Bruyère, Versailles

« Depuis les années 70, l'écoute de la musique à un niveau sonore élevé est devenue un véritable phénomène de mode et le risque de perte d'acuité auditive est aujourd'hui un véritable problème de santé publique. En général, les personnes atteintes se plaignent de sifflements dans l'oreille (d'acouphènes) ou de troubles de l'audition qui disparaissent le plus souvent après quelques jours de repos auditif. À long terme, ces effets peuvent devenir permanents et l'audition dégradée de manière irréversible. C'est pour cela que le niveau sonore pour les établissements diffusant de la musique est réglementé à 105 dB (décret 98- 1143 dit « lieux musicaux »). Le niveau des baladeurs est limité à 100 dB mais ce niveau peut être facilement amplifié par les écouteurs. Il

est donc important d'éduquer, d'informer et d'amener la population à réfléchir sur le handicap que peut engendrer l'exposition prolongée à des niveaux sonores trop élevés. »

D'après Le pharmacien et l'oreille : conseil à l'officine, thèse soutenue à l'université de Nancy en 2008 par Adeline Zannoni

Document 1

Si le son n'est pas réfléchi ou diffracté, le niveau sonore perd 6 dB à chaque fois que l'on double la distance. Si le niveau sonore est de 90 dB à 3 mètres de l'instrument, il sera de 84 dB à six mètres.

D'après Le son musical de John Pierce

Instruments	Niveau sonore à 3 mètres, en plein air
Clarinette	86 dB
Contrebasse	92 dB
Piano	94 dB
Trombone	107 dB
Grosse caisse	113 dB

Tableau 14.2

Document 2

Même si nous ne sommes pas tous égaux face au son, voici la dose moyenne de son tolérable par semaine. Au-delà de cette dose, vous risquez de léser progressivement et définitivement votre audition.

Des oreilles dans la moyenne peuvent tolérer l'écoute d'un baladeur au niveau maximum (100 dB) pendant deux heures par semaine. Elles peuvent tolérer l'écoute d'un concert à 105 dB pendant 45 min.

Les doses de son s'additionnent. II ne faut pas dépasser une dose de son par semaine. Deux heures de baladeur au niveau maximum plus un concert à 105 dB c'est trois fois la dose de son tolérée par semaine ... il y a *danger* !

On estime que le risque existe à partir d'un niveau sonore de *90 dB*. Cependant, la douleur n'apparaît qu'à partir de *120 dB*, soit à une intensité sonore 1000 fois plus élevée que le seuil de risque. Les lésions peuvent survenir sans que l'on s'en aperçoive sur le moment. Mais le véritable danger n'est pas uniquement dans le niveau sonore : il se situe aussi dans la dose de son, c'est-à-dire le temps d'exposition à un niveau sonore donné.

D'après http://www.agi-son.org

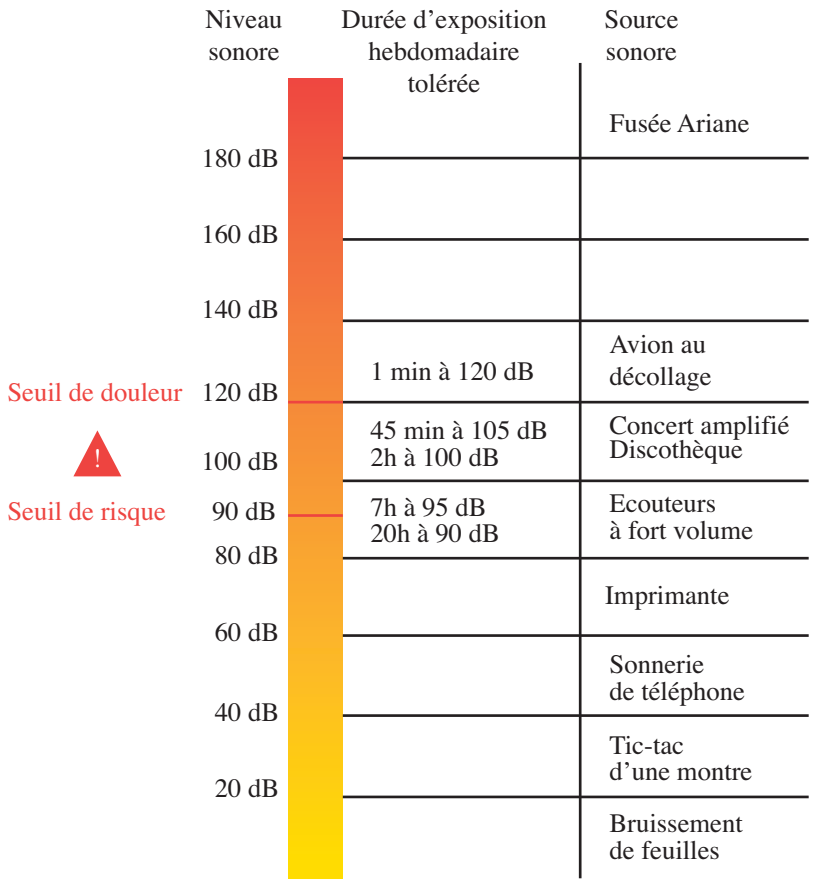


Figure 14.10

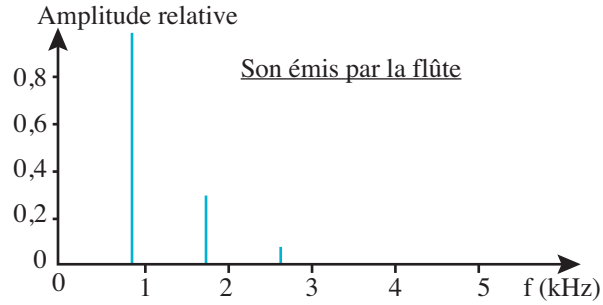
Document 3

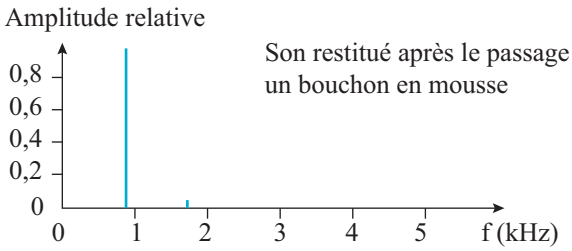
De plus en plus, à l'entrée des festivals de musique ou des discothèques, on voit des distributions gratuites de bouchons d'oreille en mousse.

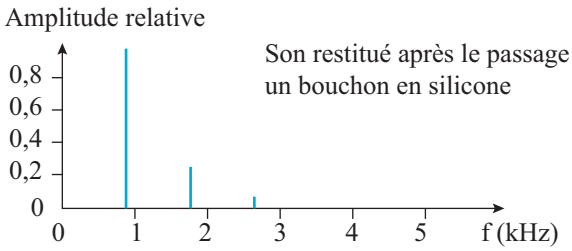
Les courbes à la page suivante présentent l'enregistrement au laboratoire du son émis par une flûte et des enregistrements du son restitué par un bouchon d'oreille en mousse et un bouchon d'oreille moulé en silicone (très utilisé par les musiciens, mais de prix assez élevé) lorsque la note jouée est un la.

Voir graphiques page suivante.

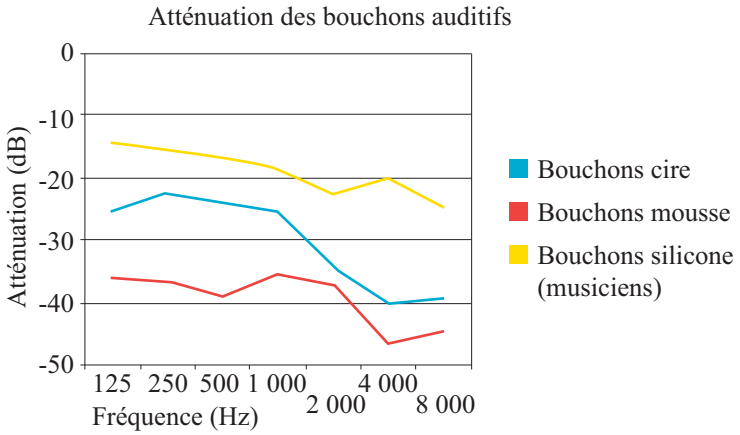
INTERROS







Document 4



1 Précisez en cochant si les réponses sont correctes ou non et précisez le numéro du document utilisé.

Questions	Réponses	Documents
1. L'analyse spectrale du son émis par la flute, dans le document 3, montre que c'est un son pur.	Oui ☐ Non ☐	Document 3
2. La hauteur du son est modifiée par le bouchon en mousse.	Oui ☐ Non ☐	
3. Un lycéen se rend à un concert sans protection auditive. Il a déjà écouté son baladeur à 100 dB pendant une heure dans la semaine. Il peut rester une heure à ce concert de niveau sonore 105 dB sans prendre de risques pour son audition.	Oui ☐ Non ☐	
4. Les bouchons en silicone sont utilisés par les musiciens car ils conservent la hauteur et le timbre du son.	Oui ☐ Non ☐	
5. Si le niveau sonore est de 90 dB à trois mètres de l'instrument, il sera de 84 dB à six mètres et de 78 dB à neuf mètres	Oui ☐ Non ☐	

2 À partir des documents proposés et de vos connaissances personnelles, indiquez, en le justifiant, vos recommandations pour profiter d'un concert en plein air sans risque auditif et tout en gardant intacte la qualité du son.

CORRIGÉS

1 QCM Vérification des connaissances

Enoncé p. 318

1 Réponse b

2 Réponse b

3 Réponse c

4 Réponse b

5 Réponse c

2 Schéma à légender

Enoncé p. 319

Lycée Sainte Marie, Créteil

1 Pavillon ;
2 conduit auditif ;
3 tympan ;
4 marteau ;
5 enclume ;
6 étrier ;
7 trompe d'Eustache ;
8 fenêtre ovale ;
9 cochlée ;
10 nerf auditif.

3 Lien entre distance et niveau sonore

Enoncé p. 319

Lycée Pasteur, Neuilly

1 Il faut que le son de 115 dB de l'enceinte soit à moins de 90 dB au niveau des oreilles de Sarah.

Donc, il faut perdre 25 dB (115 dB − 25 dB = 90 dB) ; d'après le document il faut alors être à plus de 18 m de la scène où se situent les enceintes.

2 Le son sortant de l'enceinte est à 115 dB. Si Sarah se situe à 3 m alors l'atténuation est 9,5 dB et si elle se situe à 10 m, elle est de 20 dB. Donc, à 3 m, Sarah est soumise à des sons de 105,5 dB (115 dB–9,5 dB) et à 10 m elle reçoit des ondes sonores de 95 dB. Or, même si le niveau sonore est inférieur à 120 dB, niveau de douleur où les dommages sont souvent irréversibles, dès 90 dB il y a danger pour son audition. Donc, dans les 2 cas, Sarah devrait mettre des protections auditives ou s'éloigner de l'enceinte afin de diminuer l'intensité sonore et donc de préserver son audition.

3 Si Sarah s'approche trop de l'enceinte, le son arrivant à ses oreilles sera proche de 115 dB. Le risque est que la forte vibration de la membrane basilaire de la cochlée induise une rupture des stéréocils des cellules ciliées. Alors, les cellules ciliées ne pourraient plus transformer correctement les vibrations en messages nerveux. Il y aurait donc des problèmes dans la genèse de messages nerveux pour certaines fréquences donc un risque de surdité.

4 Perte d'intensité acoustique

Enoncé p. 320

Lycée Sophie Germain, Paris

Comme R_1 correspond au milieu d'origine, et R_2 au milieu suivant, R_2 correspond à l'oreille interne et R_1 à l'air.

Application numérique :

$$R_1 = \sqrt{1{,}2 \times 1{,}46.10^5} = 418{,}56,$$
$$R_2 = \sqrt{1024 \times 2{,}53.10^9} = 1{,}6.10^6.$$

Ainsi $R_1 = 418{,}56$ et $R_2 = 1{,}6.10^6$, on a donc :

$$l = 10 \times \log\left(\frac{1{,}6.10^6}{418{,}56}\right) = 36 \text{ dB}.$$

La perte serait de 36 dB sans intervention des osselets.

5 Le plaisir d'écouter la musique

Enoncé p. 320

Lycée Richelieu, Rueil-Malmaison

D'après le texte, plusieurs zones du cerveau s'activent lors de l'écoute de la musique.

Les informations nerveuses créées par les cellules nerveuses de la cochlée, transitent par le nerf auditif, puis le tronc cérébral puis le cervelet.

Le cortex auditif primaire situé dans le lobe temporal analyse la hauteur et le volume du son.

Le rythme est analysé par les cortex frontaux et pariétaux, ainsi que par le cervelet.

Les variations de tonalité sont analysées par le cervelet, le cortex préfrontal et de nombreuses régions du lobe temporal.

Écouter de la musique active aussi l'hippocampe, zone de la mémoire, et le système de récompense qui donne la sensation de plaisir (amygdale et cortex orbitofrontal).

Donc, l'écoute de la musique active de nombreuses zones du cerveau, des zones dédiées à la perception des notes et du rythme mais aussi des zones dédiées à la mémoire et au système de récompense.

6 La perception auditive

Enoncé p. 322

Lycée Pasteur, Neuilly

1 La perception d'un son se fait en plusieurs étapes :

- Le pavillon, grâce à sa forme, canalise les sons vers le conduit auditif externe. Ces deux éléments forment l'oreille externe. Au fond du conduit auditif externe, le tympan se met à vibrer à la même fréquence que les ondes sonores.
- Ces vibrations sont transmises en amplitude et en fréquence à une chaîne de trois osselets mobiles (marteau, enclume, étrier) qui se percutent successivement. Ces osselets font partie de l'oreille moyenne. Ils permettent de transmettre et d'amplifier les ondes sonores. L'étrier (dernier des osselets) fait vibrer la fenêtre ovale de la cochlée (oreille interne).
- Les cellules ciliées situées dans la cochlée transforment les vibrations sonores en messages nerveux. Le message nerveux est codé en fréquences de potentiels d'action. Il n'y a pas de perte d'informations.
- Les messages nerveux sont transmis via le nerf auditif au cerveau. Chaque partie de l'information est traitée par une zone spécifique du cerveau.

2 Tout blocage de la transmission du son ou des messages nerveux entraîne une perte d'audition.

Pour la première étape, un bouchon de cérumen empêche la transmission des ondes sonores jusqu'au tympan. Il atténue les sons, et donc on ne perçoit plus les sons les plus faibles.

Pour la deuxième étape, une infection de l'oreille ou un tympan percé, empêchent les osselets de vibrer. L'étrier ne peut plus assurer sa fonction. La cochlée et le cerveau ne peuvent plus exercer leur fonction, on ne perçoit plus les sons.

Pour la troisième étape, l'écoute de sons trop forts détruit les cellules ciliées. Les messages nerveux ne sont plus créés. Le cerveau ne recevant plus d'informations auditives, il ne les traite pas, on ne perçoit plus les sons.

Enfin, si le nerf auditif est endommagé ou une zone du cortex traitant l'information auditive est endommagé par un AVC par exemple, l'information auditive n'est plus traitée : on ne perçoit plus les sons.

7 Le réflexe stapédien

Enoncé p. 322

Lycée La Bruyère, Versailles

1 Le réflexe stapédien est une contraction réflexe du muscle stapédien. Ce muscle est relié à un osselet de l'oreille moyenne, l'étrier.

Dans l'oreille moyenne, on trouve une série de 3 osselets : le marteau, l'enclume et l'étrier. Ces osselets transmettent les vibrations sonores du tympan jusqu'à l'oreille interne, et amplifient le son. Or, des sons trop forts détruisent les cellules ciliées présentes dans l'oreille interne. Ces cellules transforment l'action mécanique du son en messages nerveux envoyés au cerveau. Si ces cellules sont endommagées par un son trop fort, la transmission vers le cerveau n'est que partielle, on ne perçoit plus tous les sons.

Quand le muscle stapédien se contracte, il rend rigide la chaîne des osselets. Les vibrations sont moins transmises à l'oreille interne : ce réflexe permet donc une atténuation des sons transmis à l'oreille interne. Il préserve ainsi nos cellules ciliées des sons qui les endommageraient.

2 Le réflexe stapédien permet de protéger les cellules ciliées lors de la présence dans l'environnement de sons trop forts.

Mais le muscle stapédien qui permet ce réflexe est, comme tous les muscles, fatigables. Quand on écoute un son de 100 dB, il se contracte avec une certaine force. Il ne peut se contracter avec cette force que 15 minutes en moyenne. Au-delà, il ne peut plus se contracter et donc le son qui arrive à l'oreille interne est supérieur à 85 dB, limite à partir de laquelle nos cellules ciliées subissent des dommages.

De plus, l'intensité d'un son qui déclenche le réflexe stapédien est inférieure au seuil d'inconfort. Mais ce seuil est augmenté quand on est dans un environnement bruyant. En d'autres termes, si on écoute souvent de la musique à 100 dB, le seuil d'inconfort va augmenter et on ne sera plus gênés par cette musique trop forte.

Ainsi, écouter de la musique au casque, avec un niveau sonore supérieur à 100 dB plus de 15 minutes endommage les cellules ciliées de l'oreille interne. Il risque d'y avoir une perte d'audition. Répéter cette action, diminue notre seuil d'inconfort. On ne se rend plus compte que ce son est trop fort. C'est pour cette raison qu'il est déconseillé d'écouter de la musique de plus de 100 dB avec un casque.

8 Perte d'audition de Monsieur X

Enoncé p. 324

Lycée Montaigne, Bordeaux

On cherche des explications à la sensation de perte auditive de Monsieur X.

D'après le document 1, on voit que la perte d'audition est de 20dB de 125 Hz à 150 Hz ce qui est normal. Mais de 500 Hz à 4 000 Hz, un individu témoin du même âge que Monsieur X n'a quasiment pas plus de pertes auditives supplémentaires jusqu'à 2 000 Hz alors que de 500 Hz à 2 000 Hz, Monsieur X présente une perte auditive croissante allant jusqu'à environ 30 dB.

De 2 000 Hz à 4 000 Hz, un individu de 60 ans présente une perte d'audition d'environ 30 dB de plus pour les sons aigus par rapport aux sons graves.

Mais Monsieur X a toujours une perte d'audition de 30 dB supérieure au témoin. Monsieur X a donc une perte auditive supérieure à la normale pour des fréquences allant de 500 à 4 000 Hz.

D'après le document 3, on peut voir que les cellules ciliées présentent moins de cils que la normale. Or, ces cellules de la cochlée de l'organe de Corti au niveau de la membrane basilaire transforment les vibrations dues aux ondes sonores en un signal électrique qui sera transmis au cerveau via le nerf auditif. Donc, s'il manque des cils ou des cellules ciliées pour des fréquences données, il est compréhensible que Monsieur X ait des pertes auditives. En lien avec le document 1, on peut penser que ce sont les cellules de la cochlée censées être sensibles aux fréquences de 500 à 4 000 Hz qui ont dû être le plus touchées. On peut alors penser qu'il y a quelque chose dans l'environnement de Monsieur X qui a dû causer sa perte auditive supérieure à un individu témoin de même âge.

On sait que Monsieur X a travaillé dans une chaudronnerie. Or, d'après le document 2, un atelier de chaudronnerie présente un niveau sonore supérieur à 100 dB, ce qui est supérieur au seuil de danger. Donc, s'il n'a pas porté de casque antibruit comme recommandé dans son travail, Monsieur X a été exposé à des niveaux sonores dangereux ayant pu être responsables d'une destruction localisée de cils voire de cellules ciliées, ce qui expliquerait sa perte auditive.

Conclusion : au niveau de sa cochlée, Monsieur X présente des cellules ciliées ayant des cils détruits voire des cellules ciliées détruites. Leur destruction pourrait s'expliquer par les conditions de travail de Monsieur X, la chaudronnerie ayant un niveau sonore supérieur au seuil de danger. Ces cellules étant des récepteurs auditifs, leur destruction expliquerait que Monsieur X ait une perte auditive supérieure à la normale au-delà de 500 Hz. Ses sensations de pertes auditives sont donc avérées.

9 Conseils pour écouter la musique

Enoncé p. 325

Lycée La Bruyère, Versailles

1

Questions / *Justification*	Réponses	Documents
1. L'analyse spectrale du son émis par la flute, dans le document 3, montre que c'est un son pur. *Dans le spectre il apparait plusieurs pics, le fondamental et des harmoniques.*	Oui ☐ Non ☒	Document 3

Questions / *Justification*	Réponses	Documents
2. La hauteur du son est modifiée par le bouchon en mousse. *Le fondamental n'est pas modifié, la hauteur du son sera la même.*	Oui ☐ Non ☒	Document 3
3. Un lycéen se rend à un concert sans protection auditive. Il a déjà écouté son baladeur à 100 dB pendant une heure dans la semaine. Il peut rester une heure à ce concert de niveau sonore 105 dB sans prendre de risques pour son audition. *100 dB/1h = ½ dose + 45 min de concert = 1 dose > 1 dose/semaine*	Oui ☐ Non ☒	Document 2
4. Les bouchons en silicone sont utilisés par les musiciens car ils conservent la hauteur et le timbre du son. *La hauteur et le timbre sont conservés, même allure de spectre avant et avec bouchon en silicone.*	Oui ☒ Non ☐	Document 3
5. Si le niveau sonore est de 90 dB à trois mètres de l'instrument, il sera de 84 dB à six mètres et de 78 dB à neuf mètres *90 dB à 3 m donc* 90 − 6 = 84 *dB à 6 m* *84 dB à 6 m donc* 84 − 6 = 78 *dB à 12 m et non 9 m*	Oui ☐ Non ☒	Document 1

2 D'après les documents 2 et 3, pour ne pas altérer notre audition, on ne doit pas écouter plus de 20 h par semaine des bruits de plus de 90 dB. Les sons produits en plein air par les instruments du document 1 montrent des intensités supérieures à 86 dB.

D'après le document 1, le niveau sonore de la contrebasse est de 92 dB à 3 m.

En s'éloignant à une distance de 6 m donc en doublant la distance, il vaut alors 92–6 = 86 dB donc il faudrait augmenter la distance vis-à-vis de la source sonore (doc. 1).

Il faudrait de plus réduire la durée d'exposition au son (doc. 2) et tenir compte de l'addition des doses de son (doc. 2).

Donc, suivant la dose hebdomadaire de sons forts perçus, il faut augmenter les distances à la scène et limiter le nombre de concerts. On peut aussi utiliser des bouchons.

Les bouchons atténuent le son d'environ 20 dB. Ainsi le niveau sonore d'une grosse caisse, à 3 m, en plein air vaut 113–20 = 93 dB. Donc, il faudrait utiliser des bouchons qui atténuent le son (doc. 4), idéalement

des bouchons en silicone qui ne modifient pas les qualités du son (timbre, hauteur), mais ils coûtent cher. Des bouchons en mousse sont une bonne alternative pour des concerts occasionnels.

Cinquième partie

DEVOIR DE SYNTHÈSE ET ANNEXE

Chapitre 15

Devoir de synthèse

Voir nos conseils méthodologiques pour l'épreuve d'enseignement scientifique au début de ce livre.

1 Autour du carbone

★★★ 60 min > Corrigé p. 351

Document 1 : le cycle du carbone

L'élément carbone est présent sous forme de :

- deux isotopes stables : le carbone 12 (majoritaire) ^{12}C, le carbone 13 (minoritaire) ^{13}C ;
- un isotope instable : le carbone 14 (très minoritaire) ^{14}C.

Le temps de demi-vie du carbone 14 est de l'ordre de 5 570 ans. Il est continuellement produit dans la haute atmosphère grâce à des réactions nucléaires entre les noyaux des atomes d'azote 14 de l'air et des neutrons d'origine cosmique. Ces réactions maintiennent une teneur constante en carbone 14 dans l'atmosphère.

Le carbone 14 formé réagit rapidement avec le dioxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone, CO_2.

Tous les organismes vivants échangent du dioxyde de carbone avec l'atmosphère par la photosynthèse, la respiration et l'alimentation. Ils fixent le carbone 14 dans leurs tissus jusqu'à leur mort, à une teneur égale à celle de l'atmosphère. Après la mort, l'absorption et le rejet de dioxyde de carbone s'arrêtent.

Document 2 : datation au carbone 14 d'épave de bateau

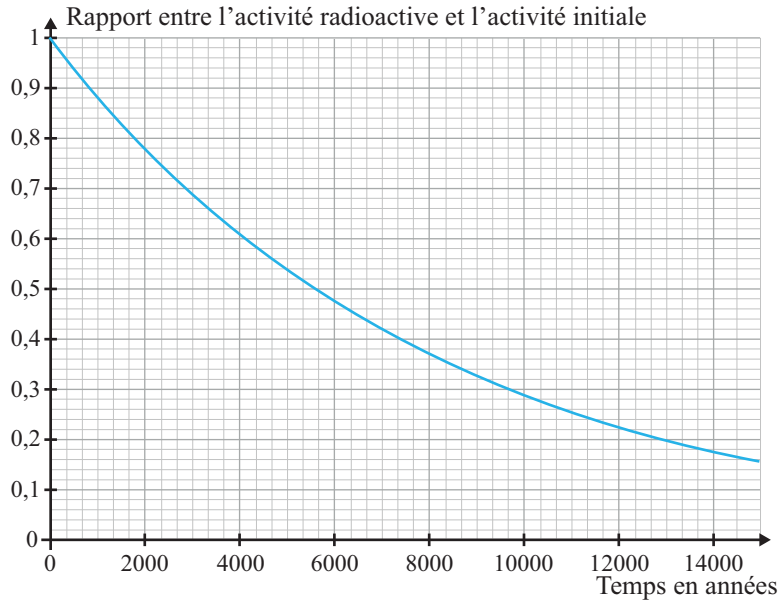
En 1983 fut découverte l'épave d'un drakkar dans la vase du port de Roskilde (à l'ouest de Copenhague).

Pour valider l'hypothèse indiquant que ce navire est d'origine viking, une datation au carbone 14 est réalisée sur un échantillon de bois prélevé sur sa coque.

L'activité A mesurée pour cet échantillon est de 12,0 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Or l'activité pour 1 gramme de carbone participant au cycle du dioxyde de carbone de l'atmosphère est égale à $A_0 = 13{,}6$ désintégrations par minute.

SUJET

Document 3 : courbe de décroissance du carbone 14



Document 4 : cristallisation du carbone

Dans les conditions standards de pression (1 bar) et de température (25 °C), le carbone cristallise sous deux formes allotropiques :

- le graphite possède un empilement de structures cristallines hexagonales, de couleur grise. C'est la forme la plus stable.
  Masse volumique : 1,9 à 2,3 g.cm^{-3}.
- Le diamant possède une structure cristalline cubique de type Blende (atomes de carbone dans un réseau cubique à faces centrées et d'autres qui occupent la moitié des espaces vides à l'intérieur de la structure). C'est la forme stable à haute température et haute pression.
  Masse volumique :
  3,15 à 3,53 g.cm^{-3} et paramètre de maille $a = 356$ pm.

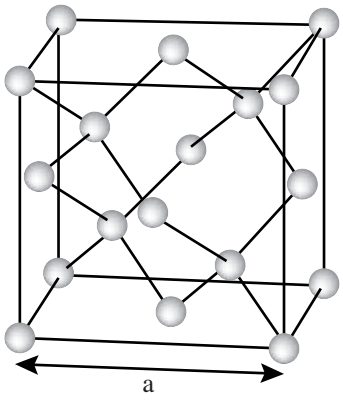


Figure 15.1 – Structure cristalline du diamant

1 Dans le document 1, on utilise l'expression : « *temps de demi-vie du carbone 14* » . Donner la définition de ce terme (noté $t_{1/2}$).

2 Justifier la variation d'activité d'un échantillon de bois de l'épave au cours du temps.

3 À l'aide du document 3, justifier que le navire appartient à la période Viking qui s'étend entre 700 et 1 000 ans.

4 Déterminer le nombre d'atomes dans une maille de diamant.

5 Calculer la masse volumique du diamant.

6 Justifier si votre résultat est en accord avec l'énoncé.

7 Justifier si cette datation permet de certifier la date du navire.

2 Vivre sur Mars

★★★ 60 min > Corrigé p. 353

L'un des rêves des spationautes est de pouvoir habiter sur Mars. De nombreux films de science-fiction font de ce rêve une réalité. Mais qu'en est-il réellement ? Serait-il possible pour l'Homme de vivre sur Mars ?

Partie 1 : Le bilan radiatif martien

Document 1 : les caractéristiques de l'atmosphère martienne, comparaison avec la Terre

Planète / Paramètres	Terre	Mars
Distance au Soleil (en unité astronomique)	1 u.a.	1,5 u.a.
Température théorique (en °C)	−18 °C	−55 °C
Température réelle moyenne (en °C)	+15 °C	−63 °C
Pression atmosphérique (en pascal)	101 300 Pa	600 Pa
Composition en gaz de l'atmosphère	• 78,087 % de diazote • 20,95 % de dioxygène • 0,93 % d'argon • 0,041 % de gaz carbonique • traces d'autres gaz comme la vapeur d'eau ou le méthane	• 95 % de gaz carbonique • 3 % d'azote • traces d'argon et de vapeur d'eau

SUJET

Document 2 : quelques paramètres astronomiques et météorologiques de Mars

« ***Inclinaison :***

Comme Mars possède un axe de rotation incliné par rapport au plan de l'écliptique, au cours de sa révolution, il y a des jours où une partie de la planète ne reçoit pas de lumière directe du Soleil. Il y a ainsi quatre saisons sur Mars, comme sur Terre. Puisque Mars est plus éloignée du Soleil, l'année sur Mars est plus longue (1,88 an terrien), et les saisons sont plus longues que sur Terre. Comme la forme de l'orbite de Mars est très elliptique les saisons ont différentes longueurs. Par exemple, dans l'hémisphère nord sur Mars, le printemps dure 7 mois, l'été dure 6 mois, l'automne dure 5,3 mois et l'hiver un peu plus de 4 mois.

Conditions météorologiques :

Les phénomènes météorologiques les plus importants sur Mars sont les tempêtes de poussière et les vents. Ces tempêtes de poussières peuvent bloquer le rayonnement solaire direct pendant de très longues périodes, parfois pendant plusieurs semaines ou même plusieurs mois ! »

D'après l'article « *Y-a-t-il assez de lumière sur Mars pour cultiver des plantes* ? » paru sur *ParlonsSciences.ca*

1. Citer les différents paramètres expliquant la température moyenne théorique de surface des planètes.
2. Pourquoi la température théorique de surface de la Terre est-elle différente de la température réelle mesurée ? Un schéma illustrant la réponse est attendu.
3. Pourquoi cet écart n'est-il pas aussi grand sur Mars que sur Terre ?

Partie 2 : L'autonomie alimentaire est-elle possible sur Mars ?

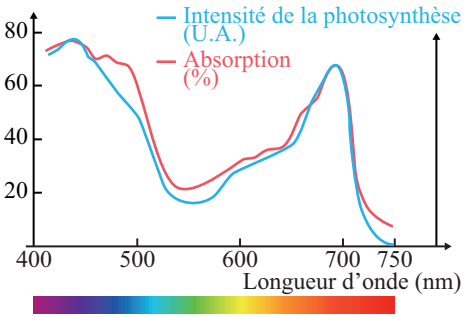
« *La température de surface de mars est de -55 °C en moyenne, ce qui rend presque impossible la présence d'eau liquide (indispensable à la vie). Deuxièmement, la gravité ne vaut qu'un tiers de celle de la Terre et la pression atmosphérique est extrêmement faible, ce qui obligerait le spationaute à toujours porter un scaphandre pour respirer. La vie humaine sur Mars est donc envisageable mais avec de gros moyens artificiels. Un autre problème de taille se pose, celui du voyage. Il faudrait plusieurs centaines de jours pour amener un petit équipage sur la planète et ce, avec d'énormes moyens énergétiques.* »

D'après le site *Univers-astronomie.fr*

Un spationaute sur Mars habite dans un dôme installé au sol, chauffé et éclairé avec divers types de lampes. De l'eau liquide est disponible. Ce dôme permet

de recréer l'atmosphère terrestre. L'éclairage du dôme est alimenté en électricité par des panneaux solaires. Le spationaute cultive des pommes de terre pour subvenir à ses besoins alimentaires.

Document 3 : spectre d'absorption de la chlorophylle et activité photosynthétique



Document 4 : expérience mettant en évidence le devenir des produits de la photosynthèse

On enferme une feuille de plant de maïs pendant 5 minutes dans une boîte transparente et éclairée.

Ensuite on retire la boîte et puis on mesure 24 heures plus tard la radioactivité dans les grains de maïs.

Les résultats sont les suivants :

	Radioactivité (− : nulle ; + + + : importante)	
Composition en masse du grain de maïs	Avant l'expérience	24 h après l'expérience
74 % d'amidon (glucides)	−	+ + +
2 % de cellulose (glucide)	−	+ + +
10 % de protéines	−	+ + +
4 % de matières grasses	−	+ + +
1,5 % de sels minéraux	−	−
8,5 % d'eau	−	−

Document 5 : quelques données sur le rendement des cultures végétales

% d'énergie lumineuse reçue utilisée pour la photosynthèse : 0,7 %.

Production primaire nette : 20 % de la production primaire brute.

Rendement de la pomme de terre : $r = 3$ kg.m^{-2}.

N.B. : en agriculture, on appelle rendement la masse végétale récoltée par unité de surface et par saison.

SUJET

Apport énergétique des pommes de terre : $A = 3\,400$ kJ.kg^{-1}.

Dépense énergétique moyenne sur le sol martien du spationaute : $D = 11\,000$ kJ.

4 Quels sont les besoins nutritifs et énergétiques des plants de pommes de terre ?

5 Pourquoi ne pas utiliser la lumière solaire dans le dôme ? Quels types de longueurs d'onde doit contenir l'éclairage du dôme ?

6 Schématiser les transferts de matières et d'énergie dans le dôme contenant le spationaute et le champ de pommes de terre. Il faudra placer : énergie solaire, panneau photovoltaïque, lampes, dôme, plants de pomme de terre et spationaute.

7 Estimer l'autonomie alimentaire du spationaute dans ce dôme, sachant que le champ de pommes de terre a une surface d'environ 100 m^2.

3 La Terre et son satellite naturel

★★★ 60 min > Corrigé p. 355

Document 1 : la Terre, une planète étudiée depuis l'Antiquité

La planète Terre est un objet d'étude qui remonte à l'Antiquité. La compréhension scientifique de sa forme et de son âge résulte d'un long cheminement, théâtre de grandes controverses.

L'un des premiers objectifs de son étude a été de comprendre la forme de notre planète. Vers la fin du IIIe siècle avant Jésus-Christ, en Égypte, l'astronome et philosophe grec Ératosthène (vers 276-194 av. J.-C.) met au point une méthode géométrique pour estimer la circonférence C $(2\pi r)$ de la Terre et ainsi son rayon r. Sa méthode se base sur une double observation : dans la ville de Syène (S), à midi le jour du solstice d'été, le Soleil éclaire le fond des puits, tandis qu'au même instant, à Alexandrie (A), les obélisques projettent des ombres.

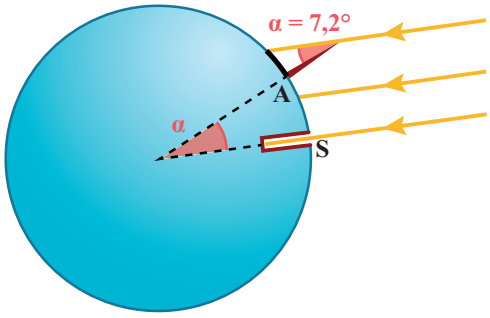


Figure 15.2 – Les travaux d'Ératosthène

Ératosthène estime alors à 7,2° l'angle formé entre la direction d'un rayon solaire et le sommet de l'obélisque. Il a besoin de connaître la distance séparant Syène d'Alexandrie. Pour déterminer cette distance, il utilise les données dont il dispose :

- il faut cinquante jours à dos de chameau pour aller d'Alexandrie à Syène ;

- un chameau parcourt cent stades par jour (un stade égyptien = 157,5 m).

Document 2 : des méthodes de datation anciennes de l'âge de la Terre

Pour Aristote (384-322 avant J-C), la Terre est immuable et n'a pas d'âge. Elle garde perpétuellement son identité car les modifications de la surface se compensent en moyenne. Dans les thèses judéo-chrétiennes, l'histoire du globe est calquée sur l'histoire de la révélation de Dieu aux hommes et les événements successifs permettent de définir une chronologie. En 1650, James Ussher (1581-1656) affirme que la création de la Terre eut lieu au début de la nuit précédant le 23 octobre de l'an 4004 avant J-C. Vers 1755, le comte de Buffon est le premier à réaliser des expériences sur la durée de refroidissement du globe. Il affirme que la Terre était, à son commencement, entière en fusion et qu'elle s'est ensuite consolidée et lentement refroidie. Il calcule alors la durée de refroidissement de boulets chauffés selon leur diamètre, et par extrapolation il arrive à un résultat de 10 millions d'années environ, bien qu'il annonce un âge de 74 000 ans pour être plus facilement admis par la communauté scientifique. Le XIX^{e} siècle est marqué par des controverses entre physiciens s'appuyant sur les travaux de lord Kelvin (notion de transfert thermique) et naturalistes dont Charles Darwin (études de fossiles en lien avec la théorie de l'évolution).

Document 3 : des roches terrestres retrouvées sur la Lune

La Lune est le satellite naturel de la Terre. Elle possède de fortes similitudes chimiques avec notre planète, ce qui laisse présager d'un lien fort entre les deux corps terrestres. Selon certaines théories, la Lune se serait formée suite à une collision d'une planète de taille importante avec la Terre. D'après la NASA et de récentes études publiées dans *Earth and Planetary Science Letters*, des fragments rocheux présents sur la Lune seraient datés d'il y a plus de 4 milliards d'années. Une hypothèse consisterait à dire que ces roches se sont initialement formées dans la croûte de notre planète et qu'elles auraient été projetées sur la Lune lors de la collision précédemment décrite. Ces roches pourraient ainsi être les plus anciennes roches terrestres jamais étudiées. L'observation au microscope électronique à balayage d'une lame mince de ces roches a permis de mettre en évidence la présence de zircon, minéral de formule $ZrSiO_4$, dans lequel il est fréquent que les atomes d'uranium se substituent à des atomes de zirconium dans la maille.

Document 4 : la datation par radiochronologie

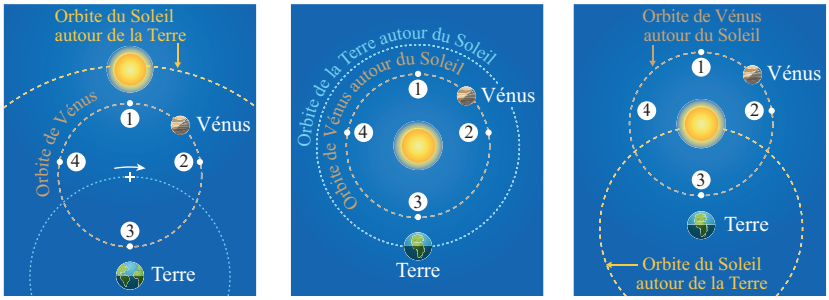
Au début du XX^{e} siècle, Ernest Rutherford utilise une méthode de datation des roches grâce à la radioactivité de l'hélium. C'est le géochimiste Patterson qui, en 1953, utilisera une méthode de datation Plomb-Plomb sur des météorites pour dater l'âge de la Terre. Le résultat obtenu est considéré comme la première estimation correcte de l'âge de la Terre, mettant définitivement

fin à la controverse scientifique sur ce sujet. Par la suite, d'autres méthodes basées sur la radiochronologie seront utilisées. Elles s'appuient sur les lois de décroissance radioactive. La décroissance radioactive permet de dater un échantillon dont l'âge est compris en un centième et 10 fois la demi-vie de l'isotope radioactif utilisé. Le temps de demi-vie correspond au temps nécessaire pour que la moitié de l'élément radioactif se désintègre. Le tableau ci-dessous répertorie les valeurs des demi-vies de cinq isotopes radioactifs.

Isotopes radioactifs	Temps de demi-vie
^{14}C (carbone)	5 730 ans
^{40}K (potassium)	1,4 Ga
^{87}Rb (rubidium)	48,8 Ga
^{235}U (uranium)	0,704 Ga
^{238}U (uranium)	4,47 Ga

Document 5 : la place de la Terre au sein de l'Univers

La Terre est une planète du système solaire. Dans le modèle héliocentrique, théorisé par Nicolas Copernic, la Terre tourne en orbite autour d'une étoile, le Soleil. Cependant cette vision n'a pas toujours été admise. En effet, pendant de nombreux siècles, ce fut le modèle géocentrique, proposé par Ptolémée plaçant la Terre au centre de l'Univers qui était accepté. Des modèles géohéliocentriques, comme celui de Tycho Brahé, furent admis. En 1610, l'astronome et mathématicien italien Galilée (1564-1642) invente la lunette astronomique et peut ainsi réaliser des observations des astres qui nous entourent. Il observe que Vénus présente, tout comme la Lune, différents aspects : des phases pleines, des croissants et des quartiers.



Le géocentrisme de Ptolémée
La Terre est au centre de l'Univers. La trajectoire de Vénus est un cercle dont le centre se déplace autour de la Terre.

L'héliocentrisme de Copernic
Le Soleil est au centre de l'Univers. La Terre et Vénus tournent autour du Soleil sur des trajectoires circulaires.

Le géo-héliocentrisme de Tycho Brahé
La Terre est au centre de l'Univers. Le Soleil tourne autour de la Terre et Vénus tourne autour du Soleil.

Figure 15.3 – Les différents systèmes proposés

Si la Terre tourne autour du Soleil, il est possible de déterminer la parallaxe p

d'une étoile. Mesurer la parallaxe d'une étoile revient à mesurer l'angle qui sépare les positions d'une étoile sur le fond des constellations à deux instants de l'année différents. À l'époque de Galilée, aucune parallaxe ne pouvait être calculée à cause du manque de précision des instruments de mesure. En 1838, l'astronome allemand Friedrich Wilhem Bessel (1784-1846) détermine la valeur de la parallaxe p de l'étoile 61 du Cygne à $8{,}61.10^{-5}$ degrés.

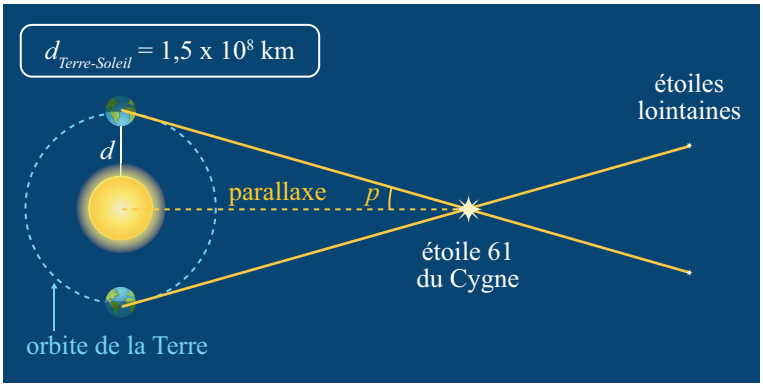


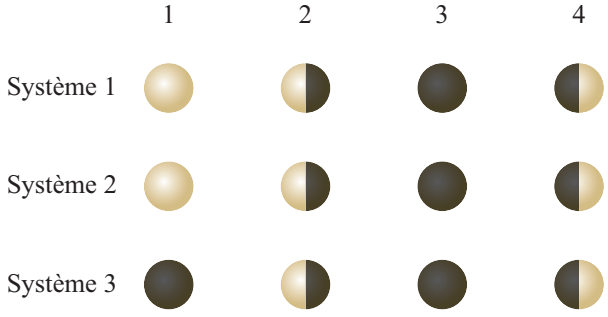
Figure 15.4 – La méthode de la parallaxe

1 À partir des données d'Ératosthène, calculer la circonférence de la Terre. En déduire son rayon.

2 Expliquer en quoi consiste la datation par radiochronologie, puis montrer que cette méthode est applicable aux roches terrestres retrouvées sur la Lune.

3 Rappeler l'âge de la Terre admis aujourd'hui et identifier les isotopes utilisables pour dater ces roches terrestres. Expliquer vos calculs.

4 Le schéma ci-dessous représente l'aspect de Vénus, vu depuis la Terre, aux points 1,2, 3 et 4 dans les trois systèmes. En vous appuyant sur le document 5, déduire le nom de chacun de ces systèmes puis dire lequel d'entre eux est invalidé par les observations de Galilée.



5 Quel est le nom de la théorie validée expérimentalement par la mesure de la parallaxe ? Quelle est sa définition ?

SUJET

6 Calculer la distance séparant le Soleil de l'étoile 61 du Cygne.

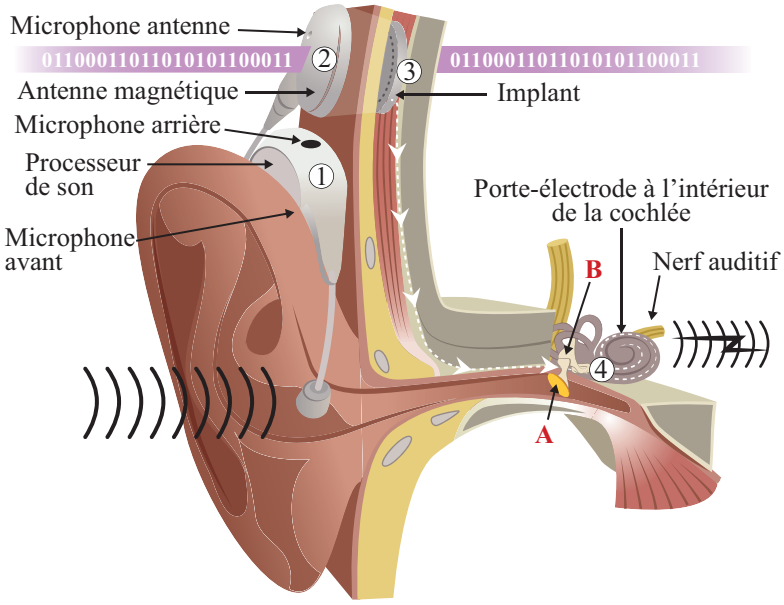
7 À partir des documents et de vos connaissances, rédiger un paragraphe argumenté d'une vingtaine de lignes en montrant que les avancées techniques ont mis fin aux controverses concernant l'âge de la Terre et sa place dans l'Univers.

4 Étude d'un implant cochléaire

★★★ 60 min > Corrigé p. 357

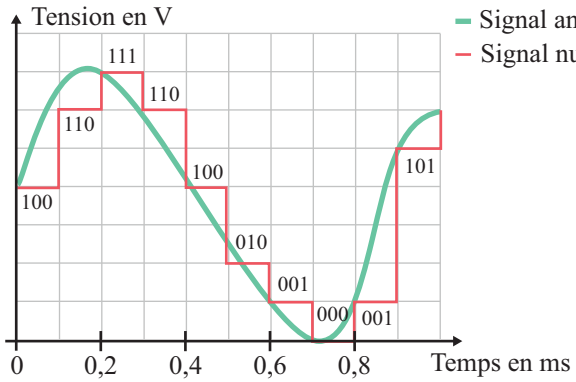
Document 1 : fonctionnement de l'implant cochléaire

On étudie dans cette partie un implant cochléaire, appareil auditif dont le but est de rendre un certain niveau d'audition à des personnes atteintes de surdité profonde.

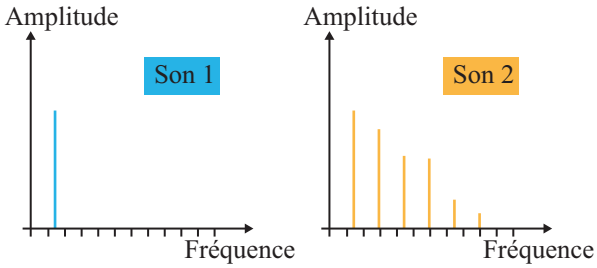


1. Le son est capté par les microphones pour subir une conversion analogique – numérique par le processeur. Le signal numérique est alors transmis à l'antenne.
2. L'antenne envoie un signal électromagnétique.
3. L'implant qui est placé chirurgicalement reçoit et convertit le signal, qui est alors acheminé à la cochlée munie en général d'un faisceau de 22 électrodes.
4. Le rôle de ce faisceau est d'émettre des impulsions électriques qui stimulent les fibres du nerf auditif. L'influx nerveux créé est envoyé vers le cerveau où il est analysé et interprété.

Document 2 : conversion analogique-numérique d'un signal issu du processeur



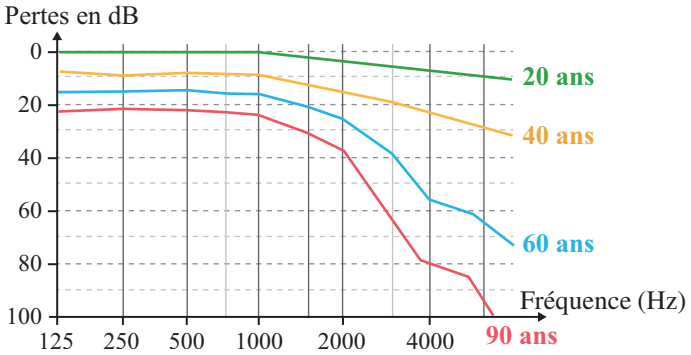
Document 3 : spectre de deux sons



Document 4 : diagramme d'audiométrie tonale

L'audiométrie tonale est une technique permettant d'évaluer la perte auditive d'un individu, exprimée en dB, pour l'ensemble des fréquences d'une conversation, situées entre 125 Hz et 8 000 Hz.

Le diagramme donné ci-contre appelé audiogramme.



SUJET

1 Nommer les légendes A et B du document 1 puis les 3 parties qui constituent l'oreille.

2 L'implant cochléaire peut être utilisé lors d'une perte d'audition par des ruptures de cellules ciliées. Expliquer le rôle des cellules ciliées de l'oreille interne dans le cas d'une audition normale. Expliquer comment l'implant cochléaire permet de corriger la surdité.

3 Déterminer la période d'échantillonnage du processeur. Vérifier que la fréquence d'échantillonnage est $f_E = 10\,000$ Hz.

4 En rappelant le critère de fidélité, déterminer si la fréquence d'échantillonnage permet de comprendre une conversation.

5 Déterminer le nombre de bits de la quantification du processeur.

6 Comparer le son 1 et le son 2 en précisant le point commun et les différences.

7 Léo, 40 ans, rencontre des troubles auditifs profonds. Son médecin lui annonce que son audiogramme correspond à celui d'une personne de 90 ans.

L'implant de Léo lui permet d'augmenter ses performances auditives et de retrouver ainsi un audiogramme correspondant à celui d'une personne de 60 ans.

Un son de fréquence égale à 4,0 kHz et de niveau sonore égal à 100 dB parvient à Léo.

Déterminer les niveaux sonores du son perçus par Léo avec et sans implant cochléaire. Conclure sur la performance de l'appareillage de Léo en expliquant l'amélioration perçue.

8 D'après les documents et vos connaissances, expliquer pourquoi les patients ont besoin d'une réadaptation pour percevoir clairement les sons.

1 Autour du carbone

> Enoncé p. 339

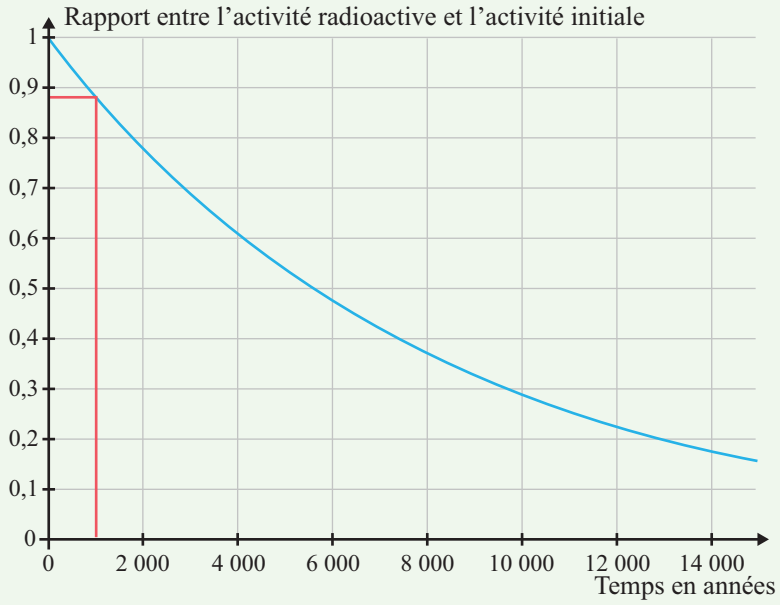
1 Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié de la quantité initiale de noyaux radioactifs contenus dans un échantillon s'est désintégrée.

2 Contrairement à un végétal vivant, le bois mort ne renouvelle plus son carbone 14, donc son activité radioactive diminue au cours du temps. Elle est plus faible que celle d'un bois vivant.

3 Rapport entre l'activité radioactive, A, et l'activité initiale :

$$A_0 = \frac{12{,}0}{13{,}6} = 0{,}88.$$

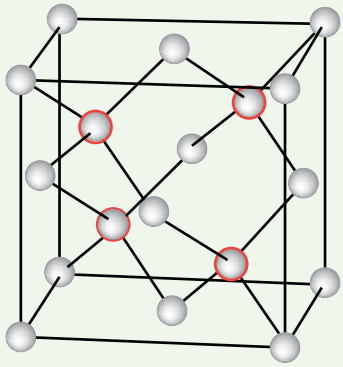
On reporte cette valeur sur la décroissance radioactive du carbone et on détermine le temps écoulé depuis le naufrage.



L'épave a été découverte en 1983 et le navire a coulé, il y a 1 000 ans donc ce navire appartient à l'époque Viking ($700 < 983 < 1\,000$).

4 Dans le réseau principal C.F.C., il y a 8 atomes de carbone aux sommets du cube. Ceux-ci sont partagés avec les 8 mailles voisines, ils comptent donc pour 1 atome dans la maille élémentaire. Il y a aussi 6 atomes de carbone au centre de chaque face, ils sont chacun partagés avec 2 mailles voisines, donc ils comptent pour 3 atomes.

CORRIGÉ



Pour les atomes à l'intérieur de la structure (en rouge sur la représentation), aucun n'est partagé avec une autre maille. Ils sont au nombre de 4 et comptent donc pour 4. Il y a, en tout, 8 atomes de carbone dans la maille élémentaire du diamant.

5 Rappel de la formule :

$$\rho = \frac{N \times M(\mathrm{C})}{\mathcal{N}_A \times a^3}.$$

Le carbone majoritaire est le carbone 12 donc c'est l'élément présent dans le diamant.

D'après son symbole chimique, sa masse molaire est :

$$M(\mathrm{C}) = 12{,}0 \text{ g.mol}^{-1}.$$

Le nombre d'atomes dans la maille est $N = 8$.

Le paramètre de maille est $a = 356 \text{ pm} = 356.10^{-12} \text{ m}$.

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{N \times M(\mathrm{C})}{\mathcal{N}_A \times a^3} \\ &= \frac{8 \times 12{,}0 \text{ g/mol}}{6{,}02.10^{23} \text{ mol}^{-1} \times (356.10^{-12}\text{m})^3} \\ &= 3{,}53.10^{6} \text{ g.m}^{-3} = 3{,}53 \text{ g.cm}^{-3}\end{aligned}$$

6 La valeur calculée est donc cohérente avec les valeurs de l'énoncé $3{,}15 \text{ g.cm}^{-3} < \rho < 3{,}53 \text{ g.cm}^{-3}$.

7 Cette méthode de datation permet de déterminer quand le bois est mort mais il a pu être travaillé des années plus tard pour la fabrication du navire.

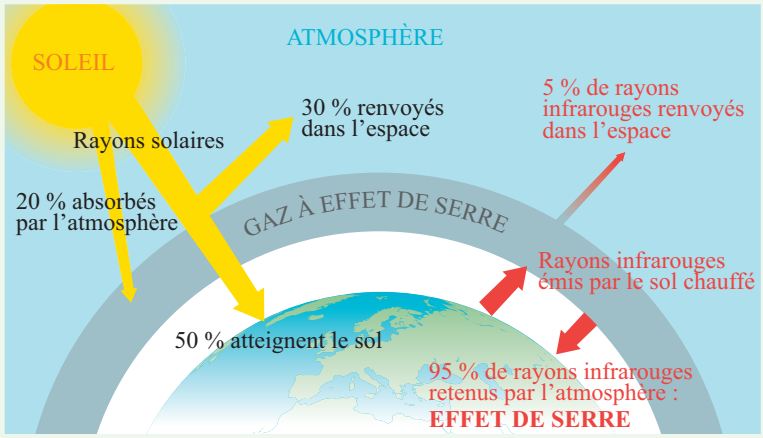
2 Vivre sur Mars

> Enoncé p. 341

1 La température théorique de surface d'une planète dépend de plusieurs paramètres.

- La puissance surfacique de l'énergie solaire reçue. Cette puissance dépend de la constante solaire, de la distance de la planète au Soleil.
- La quantité d'énergie non absorbée par la surface de la planète : l'albédo. L'albédo dépend de la nature de la surface et de sa couleur.

2 La Terre possède une atmosphère contenant des gaz à effet de serre. Ces gaz absorbent les IR émis par la surface de la planète chauffée. À leur tour, les GES émettent des IR. Parmi ces IR émis par les GES, certains viennent chauffer la surface de la Terre. Ainsi, la surface est chauffée à la fois par l'énergie solaire et par les IR émis par les GES. C'est l'effet de serre. La température de surface réelle de la Terre est donc plus élevée que celle calculée à partir du rayon de la Terre, de sa distance au soleil et de son albédo.



3 On constate que Mars possède une atmosphère contenant des GES, puisque 95 % de son atmosphère contient du gaz carbonique.

Mais on constate aussi que l'atmosphère sur Mars a une pression moins importante : l'épaisseur de cette atmosphère est donc faible.

Ainsi on peut dire que l'épaisseur de l'atmosphère martienne n'est pas suffisante pour que l'effet de serre soit aussi important que sur Terre.

4 Les plants de pomme de terre sont des végétaux chlorophylliens. Ils utilisent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique au cours de la photosynthèse. Cette énergie chimique permet de fixer le dioxyde de carbone atmosphérique. La plante a aussi besoin d'eau et de sels minéraux qu'elle puise dans le sol. Elle est donc photoautotrophe.

CORRIGÉ

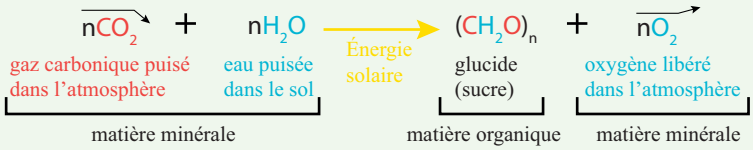


Figure 15.5 – Équation simplifiée de la photosynthèse

5 Pour que la photosynthèse soit suffisamment importante pour produire une grande quantité de matière organique consommable par le spationaute, il faut beaucoup de lumière. Dans cette lumière, il faut que les longueurs d'ondes utiles à la photosynthèse soient présentes.

Le document 2 explique qu'il y a des saisons sur Mars, et que ces saisons peuvent durer longtemps. Pendant la saison avec peu de temps d'éclairage, la photosynthèse est compromise. En outre, les tempêtes de poussières bloquent les rayons lumineux : la photosynthèse n'est plus possible. Utiliser la lumière solaire est donc déconseillé car cet apport énergétique est trop aléatoire.

Le document 3 indique que certaines longueurs d'ondes sont plus efficaces pour la photosynthèse. En effet, la chlorophylle, pigment qui capte l'énergie lumineuse au cours de la photosynthèse, absorbe davantage dans le bleu et dans le rouge. Ces longueurs d'ondes sont les plus efficaces pour la photosynthèse. Les lumières du dôme devront donc émettre au minimum ces longueurs d'ondes.

6

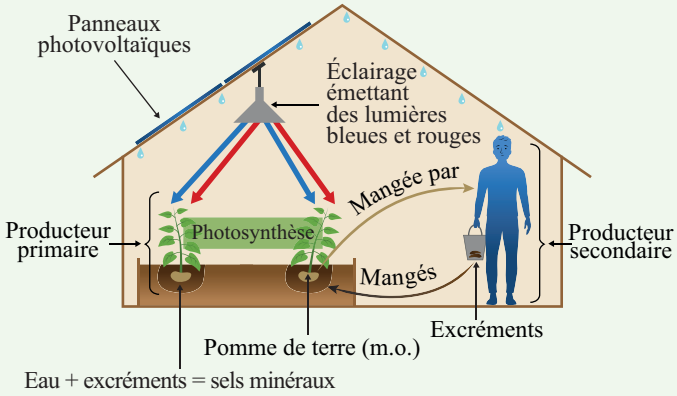


Figure 15.6 – Fonctionnement de l'écosystème « Dôme »

7 Le rendement de cette culture est de 3 $kg.m^{-2}$; le champ exploité a une surface de 100 m^2 et l'apport énergétique des pommes de terre est 3 400 $kJ.kg^{-1}$. Donc on a :

$$\text{Apport énergétique disponible} = \text{rendement} \times \text{surface} \times A$$
$$= 3 \times 100 \times 3\,400 = 1{,}02.10^6 \text{ kJ}.$$

Le spationaute a besoin de $1{,}1.10^4$ kJ chaque jour.
Son autonomie alimentaire est donc de :

$$\frac{1{,}02.10^6}{1{,}1.10^4} = 92{,}7 \text{ jours},$$

soit 92 jours (si on arrondit à l'entier inférieur).

3 La Terre et son satellite naturel

> Enoncé p. 344

1 Nous cherchons à calculer la circonférence de la Terre. Pour cela, déterminons la longueur entre Alexandrie et Syène. En traduisant l'énoncé, on a : $50 \times 100 \times 157{,}5 = 787{,}5$ m. Ainsi, on a par proportionnalité :

Longueur (km)	C	$787{,}5.10^3$
Angle (°)	360	7,2

$$C = \frac{360 \times 787{,}5.10^3}{7{,}2} = 39\,375 \text{ km}.$$

Pour calculer la valeur du rayon terrestre R_T, on utilise la formule

$$R_T = \frac{C}{2\pi} = \frac{39\,375}{2\pi} \approx 6\,267 \text{ km}.$$

2 La datation par radiochronologie est une méthode de datation basée sur la décroissance radioactive d'isotopes radioactifs. De tels isotopes se désintègrent au cours du temps, et en mesurant le nombre de noyaux restants à un instant t, il est possible de calculer la durée écoulée depuis le début de la désintégration. Il existe plusieurs isotopes radioactifs utilisables, caractérisés par leur période de demi-vie. Pour dater un échantillon, il faut donc que celui-ci contienne au moins un type d'isotope radioactif. D'après le document 2, la roche retrouvée sur la Lune contient plusieurs minéraux de zircon de formule $ZrSiO_4$. Dans ces zircons, il est fréquent que des atomes d'uranium se substituent à des atomes de zirconium. L'uranium étant un isotope radioactif, la radiochronologie est envisageable pour dater cette roche.

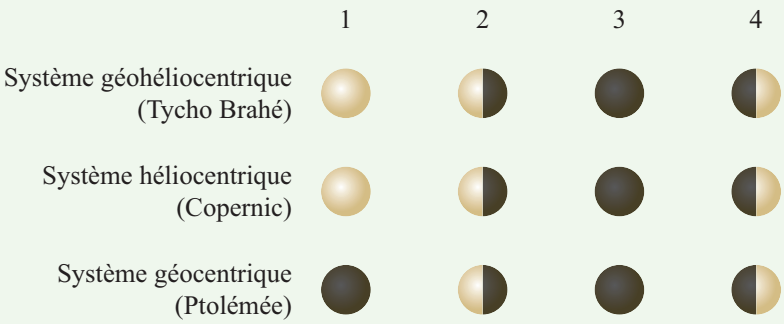
3 L'âge de la Terre admis aujourd'hui est $4{,}57.10^9$ ans. Pour savoir si un isotope est utilisable, il doit pouvoir permettre de mesurer une durée correspondant à l'âge de la planète. D'après le document 3, la décroissance radioactive permet de dater un échantillon dont l'âge est compris entre un centième et dix fois la demi-vie de l'isotope radioactif utilisé. Il est donc possible de calculer la fourchette de datation possible pour chaque isotope. On sait que 1 Ga = 10^9 ans.

CORRIGÉ

Isotope radioactif	Demi-vie (ans)		
	1	1/100	10
^{14}C	5 730	57,3	57 630
^{40}K	$1{,}4.10^{9}$	$1{,}4.10^{7}$	$1{,}4.10^{10}$
^{87}Rb	$48{,}8.10^{9}$	$48{,}8.10^{7}$	$48{,}8.10^{10}$
^{235}U	$0{,}704.10^{9}$	$0{,}704.10^{7}$	$0{,}704.10^{10}$ soit $7{,}04.10^{9}$
^{238}U	$4{,}47.10^{9}$	$4{,}47.10^{7}$	$4{,}47.10^{10}$

Puisque l'âge de la Terre est de $4{,}57.10^{9}$ ans, il est possible d'utiliser tous les isotopes proposés (^{40}K, ^{87}Rb, ^{235}U et ^{238}U), à l'exception du ^{14}C.

4 Aspect de Vénus aux points 1, 2, 3 et 4 dans les différents systèmes :



Galilée a observé des phases pleines, des croissants et des quartiers. Dans les modèles proposés, deux modèles permettent de décrire des phases de pleine Vénus : le modèle héliocentrique de Copernic et le modèle géohéliocentrique de Tycho Brahé. En revanche, le modèle de Ptolémée est invalidé par les observations de Galilée puisque dans ce modèle, on ne peut pas avoir de phase de pleine Vénus. Les observations de Galilée ne permettent cependant pas de valider le modèle de Copernic ou de Tycho Brahé.

5 La théorie validée expérimentalement par la mesure de la parallaxe est la conception héliocentrique qui place le Soleil au centre du système.

6 Par trigonométrie, dans le triangle rectangle formé par les centres de la Terre, du Soleil et de l'étoile 61 du Cygne on a :

$$\tan p = \frac{d_{TS}}{d_{ES}} \text{ d'où } d_{ES} = \frac{TS}{\tan p}.$$

Application numérique :

$$d_{ES} = \frac{1{,}5.10^{8}}{\tan(8{,}61.10^{-5})} = 1{,}0.10^{13} \text{ km}.$$

7 L'étude de notre planète a souvent été soumise à des controverses scientifiques. Tout d'abord, l'âge de la Terre n'a pas fait consensus. Si l'on pensait que la Terre était autrefois éternelle, son âge fut par la suite corrélé aux récits religieux (notamment bibliques). Des divergences d'idées entre physiciens et naturalistes ont, par la suite, alimenté les débats sur l'âge de notre planète. Les physiciens, menés par lord Kelvin, proposaient une date aux alentours de quelques dizaines de millions d'années, alors que les biologistes et géologues comme Darwin proposaient un âge de plusieurs centaines de millions d'années. Cette controverse a duré jusqu'à ce que la radiochronologie soit mise au point et utilisée par Patterson en 1955 pour déterminer un âge précis. C'est cette avancée technique qui a permis de mettre fin à la controverse sur l'âge de la Terre. Concernant la place de la Terre dans l'univers, la controverse a porté sur des modèles différents, avec notamment d'un côté le géocentrisme de Ptolémée, plaçant la Terre au centre de l'univers, et l'héliocentrisme de Copernic, faisant de la Terre un astre tournant autour du Soleil. D'autres modèles ont existé comme le géohéliocentrisme de Tycho Brahé. Cette controverse a duré longtemps. Certains outils d'observation comme les télescopes, ont permis par exemple à Galilée d'observer des phases pleines de Vénus. Ces observations ont permis d'invalider le modèle de Ptolémée, mais pas celui de Tycho Brahé. Cependant, grâce au développement de la précision des instruments de mesure, il a été possible de calculer une parallaxe de l'étoile du Cygne en 1838 et ainsi de valider définitivement le modèle héliocentrique de Copernic. La controverse sur la place de la Terre a ainsi progressivement pris fin grâce aux avancées techniques, notamment d'observation de l'Univers.

4 Étude d'un implant cochléaire

> Enoncé p. 348

1 A : tympan et B : osselets.

L'oreille est divisée en 3 parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne.

2 Les cellules ciliées captent les vibrations sonores et les transforment en signal électrique transmis au cerveau par le nerf auditif. Les électrodes vont recevoir le signal numérisé pour le convertir, puis le transmettre en signal électrique au nerf auditif.

3 D'après le graphique du document 2, une valeur d'échantillonnage est prise toutes les 0,1 ms, donc $T_E = 0{,}1$ ms.

$$f_E = \frac{1}{T_E} = \frac{1}{0{,}001s} = 10\,000 \text{ Hz}$$

CORRIGÉ

donc la fréquence d'échantillonnage est bien de 10 000 Hz.

4 Pour qu'un signal de sortie soit fidèle au signal d'entrée, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de la fréquence maximale composant le signal. D'après le document 4, la fréquence maximale d'une conversion est de 8 000 Hz, donc en appliquant le critère de fidélité, la fréquence d'échantillonnage du processeur doit être de 16 000 Hz. Le patient aura une perte d'informations avec son implant dans les hautes fréquences de la voix.

5 D'après le graphique du document 2, le signal est quantifié sur 3 bits.

6 Le son 1 et le son 2 ont la même fréquence fondamentale. En revanche, le son 2 possède des harmoniques, contrairement au son 1. Donc le son 1 est un son pur et le son 2 est un son composé.

7 Avec implant : Léo a un audiogramme correspondant à celui d'une personne de 60 ans.

Le document 4 montre qu'une personne de 60 ans perçoit un son de fréquence 4,0 kHz (4 000 Hz), avec des pertes d'environ 55 dB. Le son de niveau sonore de 100 dB sera perçu avec un niveau sonore

$L_{60} = 100 - 55 = 45$ dB.

Sans implant : Léo a un audiogramme correspondant à celui d'une personne de 90 ans. Le document 4 montre que les pertes sont alors de 80 dB. Il perçoit ce même son avec un niveau sonore de

$L_{90} = 100 - 80 = 20$ dB.

$$L_{60} - L_{90} = 45 - 20 = 25 \text{ dB}.$$

donc Léo a donc une amélioration du niveau sonore, le son lui paraît amplifié.

8 Lors de la conversion du signal analogique en signal numérique, des pertes d'informations ont lieu par la fréquence d'échantillonnage qui est insuffisante pour transmettre toutes les harmoniques, et par la quantification qui ne prend pas suffisamment de valeurs, car 3 bits permet d'obtenir $2^3 = 8$ valeurs. Donc le patient doit adapter les informations qu'il reçoit pour reconstruire et comprendre les sons qu'il perçoit.

Pour améliorer la qualité de l'information transmise, on peut améliorer les caractéristiques du processeur en augmentant sa quantification, et aussi en diminuant sa période d'échantillonnage T_E.

Annexe A

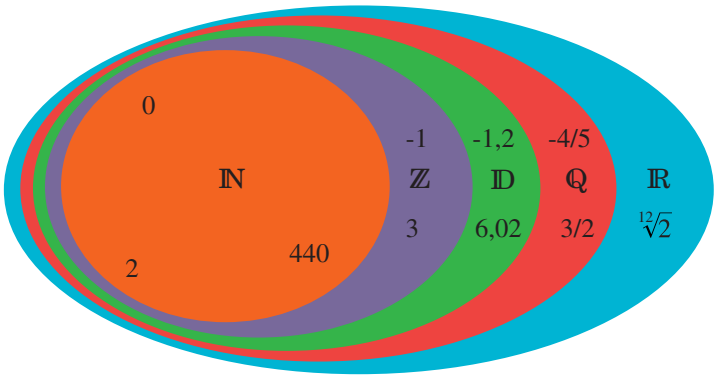
Rappels mathématiques

1 Des nombres pour compter

1.1 Ensembles

- $\mathbb{N}$: ensemble des nombres entiers *naturels*.
  Ce sont les nombres entiers positifs.
  Exemples : 1, 8, 125, 2018.
- $\mathbb{Z}$: ensemble des nombres entiers *relatifs*.
  Cet ensemble inclut les nombres entiers positifs *et* négatifs.
  Exemples : -1, 42, -135.
- $\mathbb{D}$: ensemble des nombres *décimaux*.
  Ce sont les nombres pouvant s'écrire sous la forme $\frac{n}{10^p}$, avec $n \in \mathbb{Z}$ et $p \in \mathbb{N}$.
  Exemples : $-\frac{3}{10}$, $\frac{121}{100\,000}$, 0,235.
- $\mathbb{Q}$: ensemble des nombres *rationnels*.
  Ces nombres peuvent s'écrire sous la forme $\frac{a}{b}$,
  avec $a \in \mathbb{Z}$ et $b \in \mathbb{N}^*$ (entiers naturels sauf 0).
  Exemples : $\frac{2}{3}$, $\frac{8}{11}$, $-\frac{12}{7}$.
- $\mathbb{R}$: ensemble des nombres *réels*.
  Cet ensemble contient les nombres rationnels et irrationnels.
  Exemples : 5, $\frac{4}{3}$, $\sqrt[12]{2}$, 1,31.

On rappelle qu'un nombre irrationnel ne peut pas s'écrire sous forme de fraction : π et $\sqrt[12]{2}$ sont des exemples de nombres irrationnels.



1.2 Valeur absolue

La *valeur absolue* d'un nombre est un nombre réel positif s'écrivant $|n|$.

$$\begin{cases} |n| = n & \text{si } n \geqslant 0 \\ |n| = -n & \text{si } n < 0 \end{cases}$$

Exemple : $|2| = 2$ et $|-6{,}5| = 6{,}5$.

1.3 Puissances, écriture scientifique et racines

1.3.1 - Puissances

Définition 1

On appelle *puissance* d'un réel x le nombre noté x^n tel que :

$$x^n = \underbrace{x \times x \times \cdots \times x}_{n \text{ facteurs}}.$$

Propriétés 1

Pour tous entiers relatifs m et n, pour tout réel x, et pour tout réel non nul y.

$x^n \times x^m = x^{n+m}$	$3^2 \times 3^5 = 3^7$
$\dfrac{x^n}{x^m} = x^{n-m}$	$\dfrac{2^5}{2^3} = 2^2$
$(x^n)^m = x^{n\times m}$	$(7^2)^3 = 7^6$
$(x \times y)^n = x^n \times y^n$	$(2 \times 11)^3 = 2^3 \times 11^3$
$\left(\dfrac{x}{y}\right)^n = \dfrac{x^n}{y^n}$	$\left(\dfrac{4}{3}\right)^3 = \dfrac{4^3}{3^3}$

1.3.2 - Les racines

Définition 2

On appelle *racine carrée* d'un réel positif x, le nombre réel noté $\sqrt{x}$, ou $x^{1/2}$, tel que : $(\sqrt{x})^2 = x$.

n et p sont deux entiers naturels.

Définition 3

On appelle *racine n-ième* d'un nombre positif x le nombre noté $\sqrt[n]{x}$, ou $x^{1/n}$, tel que :

$$\left(\sqrt[n]{x}\right)^n = x.$$

Sur une calculatrice, $\sqrt[n]{x}$ est généralement notée **x^1/y**.

Exemple : pour obtenir $\sqrt[12]{2}$, il faut taper :

12 - **x^1/y** - **2**

On obtient $\sqrt[12]{2} = 1{,}059$.

Propriété 2

Pour $x \geqslant 0$, $\left(\sqrt[n]{x}\right)^p = \sqrt[n]{x^p} = x^{p/n}$.

1.3.3 - Écriture scientifique

L'*écriture scientifique* est une façon de représenter les nombres décimaux qui permet d'en connaître immédiatement l'ordre de grandeur. Elle est très utilisée en physique-chimie.

Définition 4

L'*écriture scientifique* d'un nombre décimal x est : $x = a.10^n$,
où a est un nombre tel que $1 \leqslant a < 10$ et n un entier relatif.

Exemples :

- $2\,560 = 2{,}56.10^3$;
- $0{,}235 = 2{,}35.10^{-1}$.

Remarque : sur la plupart des calculatrices, les puissances de 10 sont représentées par un « E ».

Exemples

- $2{,}56.10^3$ devient : **2,56E3**
- $2{,}35.10^{-1}$ devient : **2,35E-1**

Il conviendra de ne pas utiliser la notation avec un « E » dans une copie.

1.3.4 - Ordre de grandeur

Définition 5

L'*ordre de grandeur* d'un nombre x est la puissance de 10 la plus proche de x.

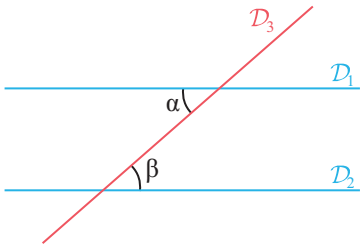
Exemples

- $2\,560 = 2{,}56.10^3$. 2,56 est plus proche de 1 que de 10. L'ordre de grandeur de 2 550 est donc 1.10^3, c'est-à-dire 1 000.
- $0{,}235 = 2{,}35.10^{-1}$, qui est plus proche de 0,1 que de 1. L'ordre de grandeur de 0,235 est donc 0,1. En revanche, l'ordre de grandeur de 0,732 est 1.

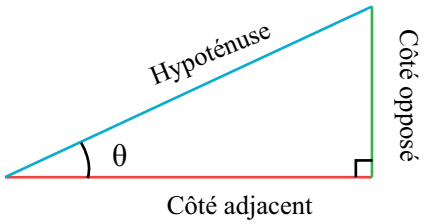
2 Géométrie

2.1 Angles alternes-internes

Si les droites $\mathcal{D}_1$ et $\mathcal{D}_2$ sont parallèles, alors les angles α et β sont des angles alternes-internes égaux.



2.2 Trigonométrie

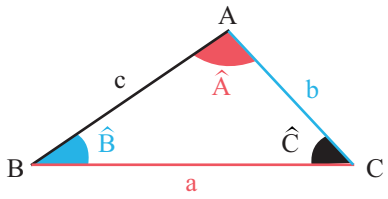


Angle θ (en degrés)	**0°**	**30°**	**45°**	**60°**	**90°**
Angle θ (en radians)	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$
$\cos\theta$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\sin\theta$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1

On a les relations fondamentales suivantes :

$\cos\theta = \dfrac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}}$	$\sin\theta = \dfrac{\text{côté opposé}}{\text{hypoténuse}}$
$\tan\theta = \dfrac{\sin\theta}{\cos\theta} = \dfrac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}}$	$(\cos\theta)^2 + (\sin\theta)^2 = 1$

2.3 Propriétés dans un triangle



Dans un triangle, la somme des angles vaut toujours 180° : $\widehat{A} + \widehat{B} + \widehat{C} = 180°$.

La loi des sinus permet d'écrire :

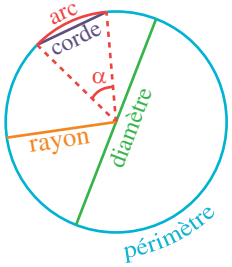
$$\frac{a}{\sin(\widehat{A})} = \frac{b}{\sin(\widehat{B})} = \frac{c}{\sin(\widehat{C})}.$$

2.4 Le cercle

Le périmètre du cercle vaut : $\mathcal{P} = 2 \times \pi \times r$

L'aire du disque vaut : $\mathcal{A} = \pi \times r^2$.

La longueur L de l'arc est proportionnelle à α : $L = K \times \alpha$ (avec $K = \dfrac{2 \times \pi \times r}{360}$).



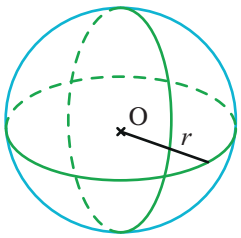
2.5 La sphère

Une sphère est une surface définie par un centre O et un rayon r.
Son aire vaut :

$$\mathcal{A} = 4 \times \pi \times r^2.$$

Le volume contenu vaut :

$$\mathcal{V} = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3.$$



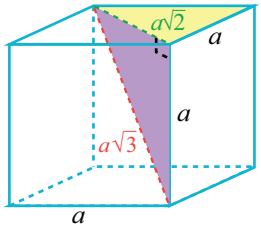
2.6 Le cube

Un cube est un polyèdre comportant 6 faces carrées identiques.
Son aire vaut : $\mathcal{A} = 6 \times a^2$.

Son volume vaut : $\mathcal{V} = a^3$.

La diagonale d'une face vaut $a\sqrt{2}$.

La diagonale du cube vaut $a\sqrt{3}$.



2.7 Échelle et proportionnalité

On parle de *proportionnalité* quand on obtient la valeur d'une grandeur en multipliant (ou en divisant) une autre grandeur par une constante, le *coefficient de proportionnalité*.

On traduit la proportionnalité par la formule $y = a.x$ et graphiquement on obtient une droite passant par l'origine.

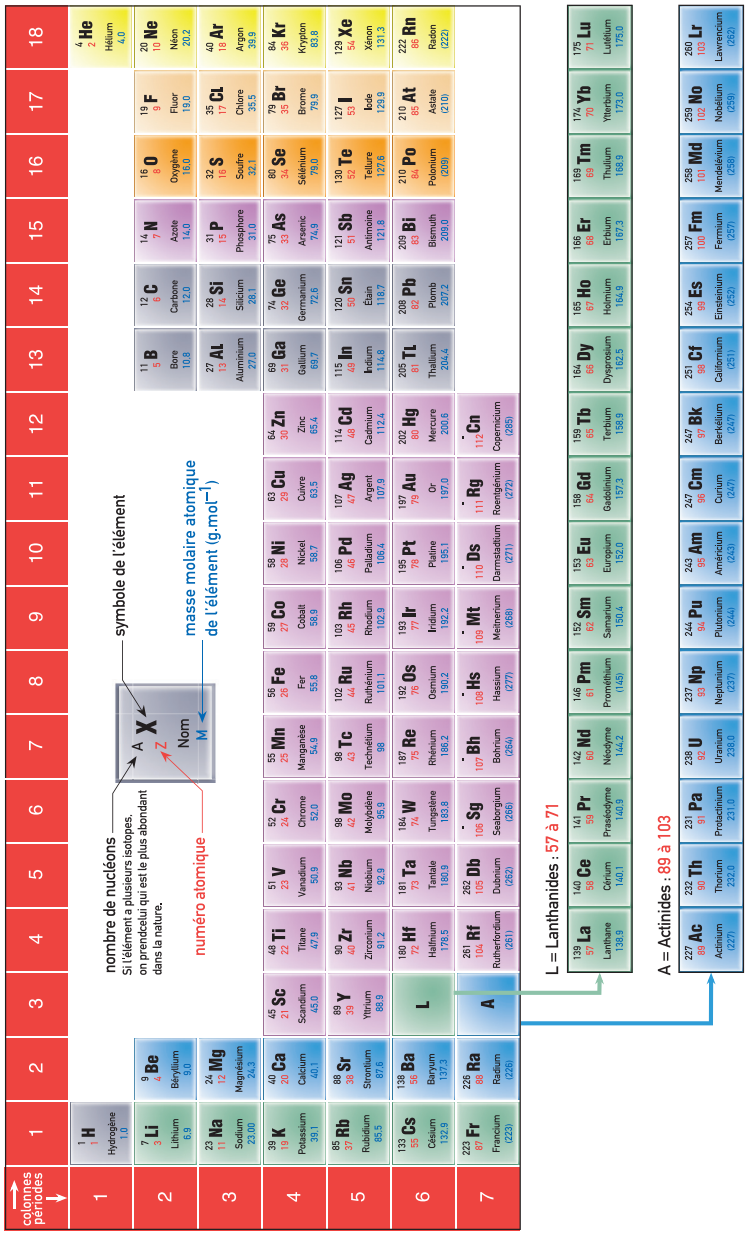
L'*échelle* (ou l'*étalon*) permet de déterminer les dimensions d'une illustration par rapport aux dimensions réelles. Si l'échelle est $1/a$ alors :

Longueur sur l'image (en cm)	1	$L_{\text{illustation}}$
Longueur réelle (en cm)	a	$L_{\text{réelle}}$

$L_{\text{réelle}} = L_{\text{illustation}} \times a$.

Annexe B

Classification périodique des éléments



Annexe C

Liste des vidéos et références Internet



Chapitre	Titre	Page
Chapitre 1	**Exercice 4 :** utilisation du tableur du document 1	**12**
Chapitre 1	**Exercice 5 :** radioactivité du phosphore 32	**14**
Chapitre 2	**Cours :** organisation des réseaux cristallins . . .	**35**
Chapitre 2	**Cours :** visualisation d'un cristal de sel	**36**
Chapitre 2	**Exercice 3 :** visualisation d'un cristal de chlorure de Césium en 3D	**54**
Chapitre 3	**Cours :** MOOC sur la membrane cellulaire . . .	**69**
Chapitre 4	**Cours :** fusion dans les étoiles	**95**
Chapitre 5	**Cours :** absorption de l'énergie solaire par l'atmosphère	**122**
Chapitre 5	**Cours :** le réchauffement climatique	**123**
Chapitre 6	**Cours :** la photosynthèse	**141**
Chapitre 7	**Cours :** régulation thermique du corps humain	**173**
Chapitre 8	**Cours :** mesure de la circonférence de la Terre	**191**
Chapitre 9	**Cours :** les méthodes de datation de l'âge de la Terre	**218**
Chapitre 10	**Cours :** le système de Copernic	**238**
Chapitre 10	**Cours :** la Lune	**241**

Chapitre	Titre	Page
Chapitre 11	**Cours :** note produite par un diapason et par une flûte à bec	**259**
Chapitre 12	**Cours :** la gamme tempérée	**279**
Chapitre 12	**Exercice 5 :** son représenté par le spectre 1	**286**
Chapitre 12	**Exercice 5 :** son représenté par le spectre 2	**286**
Chapitre 12	**Exercice 5 :** son représenté par le spectre 3	**286**
Chapitre 13	**Cours :** exemples de compression audio	**298**
Chapitre 14	**Cours :** fonctionnement du système auditif humain	**314**

Annexe D

Memo

MIXTE
Papier issu de sources responsables
FSC® C022030
www.fsc.org

Nathan est un éditeur qui s'engage pour la préservation de son environnement et qui utilise du papier composé de fibres naturelles, renouvelables, fabriquées à partir de bois provenant de forêts gérées de manière responsable et contrôlée.