

Livre du professeur - Enseignement Scientifique

Chapitre 1 : Les éléments chimiques

Introduction

Présentation

Le chapitre est divisé en trois parties, qui permettent de comprendre comment se structure la matière dans l'Univers :

- Les éléments chimiques dans les étoiles : de quoi une étoile est-elle composée ? Comment fait-on pour analyser la composition chimique d'une étoile ?
- La radioactivité : pourquoi certains noyaux sont-ils radioactifs, comment se désintègrent-ils ? La découverte de la radioactivité.
- L'origine des éléments chimiques : comment à partir de l'hydrogène sont apparus les autres éléments chimiques dans l'Univers ?

Pour atteindre cet objectif, des notions vues au collège et en seconde seront mobilisées. Il s'agit, par exemple, des notions de noyaux, d'atomes, d'éléments chimiques, d'isotopes ou encore de réaction nucléaire. Les notions de longueur d'onde ou encore de spectres d'absorption et d'émission seront également exploitées.

L'Univers est constitué d'une centaine d'éléments chimiques différents, qui ont été créés pour la plupart dans les étoiles. Le chapitre permet aussi de questionner l'élève sur la présence d'éléments chimiques sur Terre, dans les êtres vivants, et d'approfondir les notions de radioactivité et de désintégration en introduisant des notions nouvelles telles que la demi-vie radioactive.

Les principales compétences mathématiques mobilisées sont celles associées à l'analyse et l'exploitation d'un graphique (étude d'une décroissance radioactive) et l'élaboration ou l'exploitation de diagrammes d'abondance relative, circulaires ou en bâtonnets.

Enfin, ce chapitre est l'occasion de découvrir l'histoire de la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel, puis Pierre et Marie Curie.

Ce qui est enseigné au cycle 4

- Au cycle 4 :
 - La structure de l'Univers et du système solaire.
 - La matière constituant la Terre et les étoiles.
 - Les éléments sur Terre et dans l'Univers.



- Constituants de l'atome, structure interne d'un noyau atomique (nucléons : protons, neutrons), électrons.
- En seconde :
 - Le noyau de l'atome, numéro atomique, composition, écriture conventionnelle, élément chimique.
 - Transformations nucléaires, isotopes, écriture symbolique d'une réaction nucléaire.

Bibliographie

- *L'Univers à portée de main*, Christophe Galfard, Flammarion (2015).
- *Le beau livre de l'Univers - du Big Bang au Big Crunch*, Jacques Paul et Jean-Luc Robert-Esil, Dunod (2016).
- *Du ciel*, Aristote, Flammarion (2014).
- *À la poursuite du Big Bang*, John R. Gribbin, Flammarion (1992).
- *Georges et les secrets de l'univers*, Stephen Hawking, Pocket Jeunesse (2007).
- *Trous noirs et bébés univers et autres essais*, Stephen Hawking, Odile Jacob (2000).
- *Les secrets de l'Univers*, Hubert Reeves, Robert Laffont (2016).
- Une brève histoire du temps, Stephen Hawking, Flammarion (1989).
- *Discours sur l'origine de l'Univers*, Etienne Klein, Flammarion (2016).

Sitographie

- Un ensemble de ressources pédagogiques disponibles sur le site du CEA enseignants, avec vidéos et livrets.
http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/fiches-essentiel-sur.aspx?g_7f81ec74_d58a_4e0f_8a3b_0aa4101f078a=7&g_b1e9ab68_7ea3_4fcf_a031_c9b450a4cd0c=2
- Plusieurs articles et vidéos sur les supernovae :
 - *SN1987A : l'explosion en accéléré de la célèbre supernova depuis 30 ans*, 2019.
<https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/sn1987a-explosion-accelere-celebre-supernova-depuis-30-ans-4513/>
 - *Supernova : quelle est la prochaine étoile qui pourrait exploser ?*
<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/astronomie-supernova-prochaine-etoile-pourrait-exploser-11560/>
 - *Galaxies et supernova*, 2015.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/webdoc/odyssee-lumiere/galaxies-et-supernova.aspx>
- Différentes ressources sur les étoiles :
 - *La vie et la mort d'une étoile et de ses planètes*, 2019.
<https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/vie-mort-etoile-planete-6322/>
 - *Formation de galaxies*, 2015.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/webdoc/odyssee-lumiere/formation-de-galaxies.aspx>
 - *Fusion(s) - La fusion au cœur des étoiles*, 2014.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/fusions-fusion-au-coeur-des-etoiles.aspx>
- L'origine de l'Univers :
 - *L'univers sort-il d'un œuf ?* 2017.





- <https://www.lesite.tv/edutheque/lycee-general-et-technologique/physique-chimie/video/l-univers-sort-il-d-un-oeuf>

 - *Comment s'est créée la matière ?* 2017.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/origine-creation-matiere.aspx>
 - *Le Big Bang : de quoi parle-t-on exactement ?* 2018.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/big-bang-klein.aspx>
 - *L'histoire de l'Univers,* 2017.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/matiere-noire-et-origine-de-la-matiere.aspx>
- *Les étoiles , creusets d'atomes*, conférence de S. Panebianco.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/marathon-des-sciences-etoiles-creusets-d-atomes.aspx>
- La radioactivité :
 - *Expérience : détecter la radioactivité grâce à la chambre à brouillard*, 2016.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/radioactivite/experience-chambre-a-brouillard.aspx>
 - *La datation par le carbone 14 en vidéo*, 2014.
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/physique-chimie/datation-carbone-14.aspx>
- Le site.tv (après connexion avec un compte professeur) propose des vidéos, accompagnées de livrets pédagogiques.
<http://site.tv/>

Idées d'activités alternatives ou complémentaires

- Recherches historiques sur la découverte de la radioactivité.
 - Informations complémentaires sur le site :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/découverte-radioactivite.aspx>
 - Un livret pédagogique (*La radioactivité*) à télécharger :
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/livrets/la-radioactivite.aspx>
- Recherches sur l'astrophysique nucléaire.
 - Un livret pédagogique (*Astrophysique nucléaire*) à télécharger :
<http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/livrets/astrophysique-nucleaire.aspx>

Sommaire

- **Activité 1** - documentaire - Les éléments chimiques dans les étoile p. 14.
- **Activité 2 - documentaire** - La radioactivité, un phénomène naturel p. 15.
- **Activité 3 - groupe** - l'origine des éléments chimiques p. 16.



Activité 1 : Les éléments chimiques dans les étoiles (documentaire)

1.1. Généralités

Cette activité introductory permet à l'élève de réinvestir plusieurs savoirs et savoir-faire, afin de répondre à une première question : quels sont les éléments chimiques présents dans une étoile et comment peut-on faire pour les identifier ?

Objectifs notionnels :

- Spectre d'émission ;
- Origine thermique ;
- Longueur d'onde ;
- Spectre d'absorption.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser le spectre du Soleil pour identifier certains éléments chimiques qui le composent ;
- Produire une représentation graphique de l'abondance des éléments chimiques dans une étoile (compétence mathématique).

Durée : 40 minutes.

1.2. Présentation des documents

1.2.1. Ensemble documentaire A

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le spectre du Soleil est composé d'un fond continu coloré et de raies noires. Ce spectre ne donne pas la totalité des raies noires du spectre du Soleil.
- **Document 2** : Le tableau donne la composition, en pourcentage massique, de la photosphère (couche de gaz externe d'une étoile).

Réponses attendues aux questions :

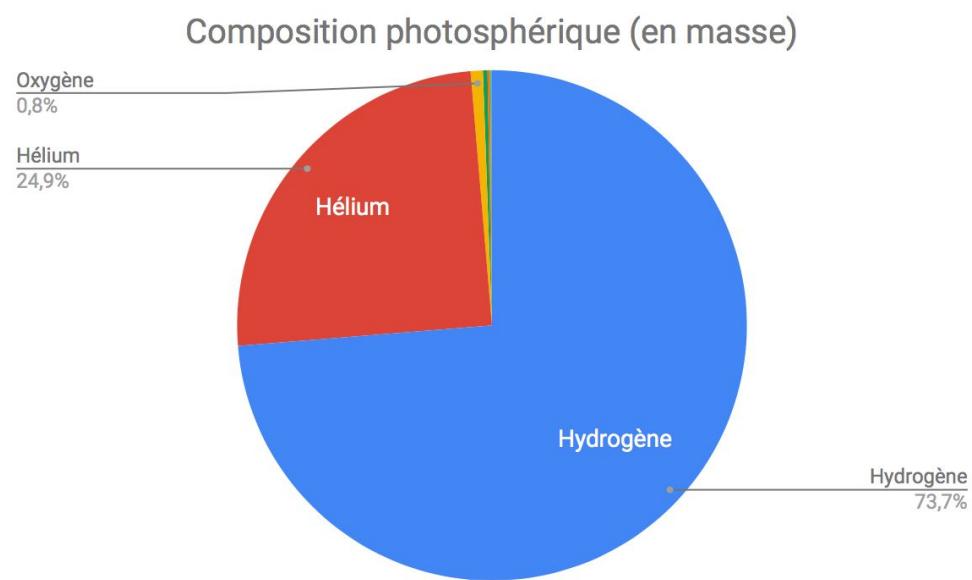
- 1. La raie « C » qui se trouve dans le spectre du Soleil a une longueur d'onde qui semble compatible avec la valeur de 656 nm. On en déduit que l'atome d'hydrogène (dont une des raies a une longueur d'onde de 656 nm) est très probablement présent dans le Soleil.
- 2. Le diagramme circulaire est tracé en utilisant la correspondance de chaque pourcentage massique avec l'angle du diagramme.
Un angle de 360° correspond à un pourcentage de 100 %.
Un angle α correspond à un pourcentage p.



Pour déterminer l'angle, on applique donc la relation : $\alpha = \frac{p \cdot 360}{100}$

| Élément | Composition photosphérique (pourcentage) | Angle (°) |
|-----------|--|-----------|
| | 100 | 360° |
| | p | α |
| Hydrogène | 73,46 | 264,456 |
| Hélium | 24,85 | 89,46 |
| Oxygène | 0,77 | 2,772 |
| Carbone | 0,29 | 1,044 |
| Fer | 0,16 | 0,576 |
| Néon | 0,12 | 0,432 |

Le diagramme circulaire est tracé ci-dessous :



3. Pour identifier les éléments chimiques présents dans une étoile, on peut exploiter son spectre. Le spectre du Soleil permet d'obtenir de nombreuses informations sur la température et composition chimique de la photosphère (enveloppe externe de l'étoile).

Le spectre d'une étoile est en effet la superposition d'un spectre d'origine thermique (fond coloré) et des raies noires, témoins de la présence de plusieurs éléments chimiques dans l'enveloppe externe de l'étoile.

Les raies noires sont caractérisées par leurs longueurs d'onde, qui permettent ainsi d'identifier la présence des éléments chimiques par comparaison avec les longueurs d'ondes connues.

Si les raies correspondant à l'élément chimique sont présentes, on peut en déduire que l'élément chimique est présent dans la photosphère de cette étoile.



Ressources complémentaires :

- Un exercice proposé par l'observatoire de Paris, sur l'analyse du spectre solaire :
https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_tp-spectre-soleil/deuxiemepartie.html
- Une vidéo présentant les spectres et la composition chimique du Soleil (CEA) :
<https://education.francetv.fr/matiere/sciences-de-la-vie-et-de-la-terre/premiere/video/spectres-et-composition-chimique-du-soleil>
- Un article sur la spectroscopie (Astronoo) :
<http://www.astronoo.com/fr/articles/spectroscopie.html>
- Fiche d'identité du Soleil (société astronomique de Rennes) :
<https://www.astro-rennes.com/planetes/soleil.php>

1.2.2. Ajouts libres

On peut aussi proposer une exploitation documentaire complémentaire, la détermination de la composition chimique d'une étoile par étalonnage (ancien programme de seconde).

- Voici un exemple d'activité proposé par le CLEA (Comité de Liaison Enseignants Astronomes) :
http://clea-astro.eu/avec-nos-eleves/lycees/seconde/etude-spectre-etoile-2/CLEA_spectre_etoile_professeur_2.pdf
- Voici un dossier complet (*l'Essentiel sur les étoiles*) sur les étoiles (CEA) pour approfondir ses connaissances et nourrir la curiosité des élèves :
<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/essentiel-sur-les-etoiles.aspx>

Activité 2 : La radioactivité, un phénomène naturel (documentaire)

2.1. Généralités

Cette deuxième activité permet à l'élève de présenter le phénomène de radioactivité, sa découverte par Henri Becquerel et de l'interpréter en étudiant l'exemple de la désintégration du carbone 14.

Objectifs notionnels :

- Éléments chimique ;
- Noyau atomique ;
- Isotope ;
- Noyau instable ;
- Radioactivité ;

Document sous licence libre Creative Commons





- Certains noyaux sont instables et se désintègrent (radioactivité) ;
- L'instant de désintégration d'un noyau radioactif individuel est aléatoire ;
- La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée ;
- Cette demi-vie est caractéristique du noyau radioactif.

Objectifs méthodologiques :

- Écrire l'équation de désintégration d'un noyau radioactif ;
- Calculer le nombre de noyaux restants au bout de n demi-vies ;
- Estimer la durée nécessaire pour obtenir une certaine proportion de noyaux restants ;
- Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie ;
- Utiliser une décroissance radioactive pour une datation (exemple du carbone 14).

Durée : 40 minutes.

2.2. Présentation des documents

2.2.1. Ensemble documentaire A

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce texte retrace l'histoire de la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel. Cette histoire est résumée dans la courte vidéo proposée en complément numérique.
- **Document 2** : Cette courbe montre l'évolution du nombre de noyaux radioactifs dans un échantillon qui contient au départ (à la date $t = 0$) N_0 noyaux. La courbe verte représente l'évolution du nombre de noyaux de carbone 14 au cours du temps dans l'échantillon.
- **Document 3** : Ce schéma présente de façon imagée le processus de désintégration du noyau du carbone 14 lorsqu'il se désintègre en azote 14. Le texte explique qu'un neutron se transforme en proton, et que le noyau éjecte par ailleurs un électron.

Réponses attendues aux questions :

- 1. Becquerel a affirmé que la radioactivité était un phénomène naturel car des plaques photographiques avaient été impressionnées comme si elles avaient été exposées à des rayonnements, alors qu'elles étaient dans un tiroir, juste à proximité des sels d'uranium. Ce n'étaient donc pas les rayonnements « absorbés » par l'uranium lors d'une exposition à la lumière qui avaient ensuite été réémis et qui avaient impressionné la plaque (phénomène de fluorescence, ou de phosphorescence à plus long terme), mais des rayonnements émis spontanément par l'uranium.
- 2. En analysant l'évolution du nombre de carbone 14 en fonction du temps (courbe verte) on détermine l'abscisse du point de la courbe dont l'ordonnée est $\frac{N_0}{2}$. Ce point a pour abscisse 5730 ans. La population en carbone 14 d'un échantillon est divisée par deux en 5730 ans. De même, on cherche l'abscisse du point de la courbe dont l'ordonnée est $\frac{N_0}{4}$. Ce point a pour abscisse 11 460 ans, soit $2 t_{1/2}$.
- 3. Le noyau de l'atome de carbone 14 est constitué de 6 protons et 8 neutrons.



En effet, le nom « carbone 14 » signifie que le noyau contient 14 nucléons (protons + neutrons), 14 correspondant au nombre de masse A, soit $A = 14$. De plus, il est indiqué que le numéro atomique Z du carbone est $Z = 6$. Le noyau contient donc 6 protons. Le noyau est donc constitué de N neutrons, tel que $N = A - Z = 14 - 6 = 8$ neutrons. La représentation symbolique du noyau de l'atome de carbone 14 est donc : ${}_{6}^{14}C$.

- **4.** Au cours de la désintégration, un neutron se transforme en proton, en éjectant un électron. Le noyau de l'atome d'azote ainsi formé contient 7 protons et 7 neutrons, et sa représentation symbolique est : ${}_{7}^{14}N$. L'équation de désintégration s'écrit :
$${}_{6}^{14}C \rightarrow {}_{7}^{14}N + {}_{-1}^0 e^-$$
- **5.** La radioactivité est un phénomène naturel qui se produit lorsqu'un noyau instable se transforme (on dit qu'il se désintègre) en un autre noyau plus stable. Au cours de la désintégration, un des nucléons peut se transformer en un autre nucléon : un proton peut se transformer en neutron ou réciproquement.
Remarque : il existe un autre type de radioactivité, la désintégration α au cours de laquelle un noyau instable éjecte un noyau d'hélium ${}_{2}^4He$, car le noyau est trop gros.

Ressources complémentaires :

- Un dossier complet sur la radioactivité (CEA) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/la-radioactivite.aspx>
- Un dossier futura-sciences :
<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-radioactivite-512/>
- Plusieurs ressources sur la radioactivité (CEA), un quiz, des animations, des vidéos, des ressources :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/themes/radioactivite.aspx>
- Une vidéo présentant les étapes de la datation au carbone 14 (CEA) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/activites-du-cea/metiers/metiers-datation-c14.aspx>
- Un dossier complet sur la datation au carbone 14 (les savanturiers) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/les-savanturiers/carbone-14-maitre-du-temps.aspx>

Activité 3 : L'origine des éléments chimiques (activité de groupe)

3.1. Généralités

Cette troisième activité est une activité de groupe, que l'on peut mettre en œuvre sous forme de « classe puzzle » par exemple (voir compléments en fin de document).

Objectifs notionnels :

- Éléments chimique ;
- Noyau atomique ;
- Isotope ;



- Certains noyaux sont instables et se désintègrent (radioactivité) ;
- Les noyaux des atomes de la centaine d'éléments chimiques stables résultent de réactions nucléaires qui se produisent au sein des étoiles ;
- La matière connue de l'Univers est formée principalement d'hydrogène et d'hélium.

Objectifs méthodologiques :

- Reconnaître si une réaction nucléaire relève d'une fusion ou d'une fission ;
- Écriture conventionnelle d'un noyau ;
- Écriture symbolique d'une réaction nucléaire ;
- Produire et analyser différentes représentations graphiques de l'abondance des éléments chimiques (proportions) dans l'Univers, la Terre, les êtres vivants ;
- L'équation d'une réaction nucléaire stellaire étant fournie, reconnaître si celle-ci relève d'une fusion ou d'une fission.

Durée : 55 minutes.

Commencer la séance en montrant cette courte vidéo (3min30), qui retrace l'histoire de la création des éléments chimiques.

- Lien vers la vidéo « comment s'est créée la matière ? » (CEA recherche)
<https://www.youtube.com/watch?v=l-fWI6dKEys>
- Lien vers une vidéo plus complète (50 min) : Superscience « La naissance de l'Univers »
<https://www.dailymotion.com/video/xjw74t>
- Compléments sur la naissance, la vie et la mort d'une étoile (question 1) :
<http://www.nupecc.org/NUPEX/index.php?g=textcontent/nuclearanduniverse/birthlifeanddeath&lang=fr>

3.2. Présentation des documents

3.2.1 Groupe 1

Présentation des documents : Le Soleil, siège de réactions de fusion

- **Document 1** : Les réactions à l'origine de la formation des premiers éléments chimiques (H, He et Li).
- **Document 2** : La chaîne proton-proton et le cycle CNO à l'origine de la formation des éléments chimiques jusqu'à l'azote.
- **Document 3** : Schéma du cycle CNO qui permet d'expliquer la conversion d'hydrogène en hélium dans les étoiles lourdes.
- **Document 4** : Texte expliquant ce qui se passe lors de l'explosion d'une étoile.

Ressource complémentaire :





- Lien vers une vidéo Universciences (2 min 50) : *Les premiers éléments de l'Univers*
<https://education.francetv.fr/matiere/physique-chimie/seconde/video/les-premiers-elements-de-l-univers>

3.2.2. Groupe 2

Présentation des documents : Les réactions nucléaires

- **Document 5** : Présentation des différents types de radioactivité.
- **Document 6** : Présentation de la fusion et de la fission.
- **Document 7** : Synthèse de noyaux artificiels au laboratoire.

Ressources complémentaires :

- Un article racontant l'histoire de la découverte de la radioactivité artificielle par Irène Joliot-Curie et Frédéric Joliot (Pour la Science - sur abonnement) :
<https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/la-radioactivite-artificielle-4517.php>
- Un article rédigé par Pierre Radvanyi (CNRS) sur la découverte de la radioactivité artificielle :
<http://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/joliot-analyse.pdf>
- Plein de ressources intéressantes au sujet de la radioactivité : le Musée Curie
<https://musee.curie.fr>

3.2.3. Groupe 3

Présentation des documents : Abondance des éléments chimiques dans l'Univers

- **Document 8** : Diagramme montrant l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers.
- **Document 9** : Diagramme circulaire montrant l'abondance relative des éléments chimiques dans le monde du vivant.
- **Document 10** : Tableau donnant les valeurs, exprimées en pourcentage, de l'abondance des éléments dans la croûte terrestre.
- **Document 11** : Diagramme en bâton présentant l'abondance relative des principaux éléments chimiques présents dans le sol lunaire.

Ressources complémentaires :

- Une vidéo présentant l'élément chimique le plus abondant de l'Univers (Universciences) :
<https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/element-plus-abondant-univers-2689/>



- Un article et un tableau périodique interactif sur l'origine des éléments chimiques (sciences et avenir) :
https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/150-ans-du-tableau-periodique-a-quoi-servent-les-elements_108482

3.2.4. Groupe 4

Présentation des documents : Abondance des éléments chimiques dans l'Univers

- **Document 12** : Du Big Bang jusqu'à l'apparition de la vie, quelles sont les principales étapes de la formation de l'Univers.
- **Document 13** : Les conditions dans lesquelles la vie peut apparaître.
- **Document 14** : Schéma présentant les principales étapes de la formation des premiers noyaux.
- **Document 15** : Frise présentant les principales étapes du Big Bang à nos jours.

Ressources complémentaires :

- Une vidéo présentant l'élément chimique le plus abondant de l'Univers (Universciences) :
<https://www.futura-sciences.com/sciences/videos/element-plus-abondant-univers-2689/>
- Un article et un tableau périodique interactif sur l'origine des éléments chimiques (sciences et avenir) :
https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/150-ans-du-tableau-periodique-a-quoi-servent-les-elements_108482

3.3. Réponses attendues aux questions

- **Groupe 1 :**
 - Question 1 : Les principales étapes de la vie d'une étoile sont résumées ci-dessous :
 - Pendant les premiers instants (nucléosynthèse primordiale), les particules élémentaires fusionnent pour former les noyaux d'atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium.
 - Puis, ils fusionnent pour former les isotopes de l'hydrogène, l'hélium et le béryllium.
 - Ensuite, tout au long de la « vie » de l'étoile, se produit la nucléosynthèse stellaire : les éléments chimiques, jusqu'au fer, sont formés au sein de l'étoile, au cours de réaction de fusion. On distingue principalement deux cycles : le cycle CNO et la chaîne « proton-proton ».





Certaines étoiles, très grosses, explosent en éjectant les éléments chimiques qu'elles contiennent et d'autres, plus lourds, qui sont créés à cette étape : la nucléosynthèse explosive.

- Question 2 : Les équations du cycle CNO sont écrites ci-dessous. Elles traduisent les réactions nucléaires qui se produisent pendant la nucléosynthèse stellaire. L'ordre dans lequel on écrit les équations n'a pas d'importance. On choisit par exemple de commencer la description des réactions qui se produisent dans le cycle par la réaction qui transforme le carbone 12 en azote 13.

- **Réaction 1 :** La réaction qui permet au carbone 12 de se transformer en azote 13 est une réaction de fusion (réaction provoquée) : le noyau de carbone 12吸吸收 un noyau d'hydrogène ${}_1^1H$ (proton). En se désexcitant, le noyau d'azote 13 émet un rayonnement gamma γ . L'équation s'écrit :
$${}_{\text{6}}^{12}\text{C} + {}_{\text{1}}^1\text{H} \rightarrow {}_{\text{7}}^{13}\text{N} (+ \gamma)$$
- **Réaction 2 :** Ensuite, l'azote 13 se désintègre (réaction naturelle) pour former du carbone 13, en éjectant un positon e (${}_{\text{0}}^0e^+$) selon l'équation :
$${}_{\text{7}}^{13}\text{N} \rightarrow {}_{\text{6}}^{13}\text{C} + e (+ \nu)$$
 OU
$${}_{\text{7}}^{13}\text{N} \rightarrow {}_{\text{6}}^{13}\text{C} + {}_{\text{1}}^0e^+ (+ \nu)$$

Il y aussi émission d'un neutrino ν .
- **Réaction 3 :** Le carbone 13 ainsi formé absorbe un noyau d'hydrogène ${}_1^1H$ (proton) pour former un noyau d'azote 14 selon l'équation
$${}_{\text{6}}^{13}\text{C} + {}_{\text{1}}^1\text{H} \rightarrow {}_{\text{7}}^{14}\text{N} (+ \gamma)$$
. Lorsque le noyau d'azote 14 se désexcite, il émet un rayonnement gamma γ .
- **Réaction 4 :** Le noyau d'azote 14 absorbe un noyau d'hydrogène ${}_1^1H$ (proton) pour former un noyau d'oxygène 15 selon l'équation :
$${}_{\text{7}}^{14}\text{N} + {}_{\text{1}}^1\text{H} \rightarrow {}_{\text{8}}^{15}\text{O} (+ \gamma)$$
. En se désexcitant, le noyau d'oxygène 15 émet un rayonnement gamma γ .
- **Réaction 5 :** Ensuite, l'oxygène 15 se désintègre (réaction naturelle) pour former de l'azote 15, en éjectant un positon e (ou ${}_{\text{0}}^0e^+$) selon l'équation :
$${}_{\text{8}}^{15}\text{O} \rightarrow {}_{\text{7}}^{15}\text{N} + e (+ \nu)$$
 OU
$${}_{\text{8}}^{15}\text{O} \rightarrow {}_{\text{7}}^{15}\text{N} + {}_{\text{0}}^1e^+ (+ \nu)$$

Il y aussi émission d'un neutrino ν .
- **Réaction 6 :** Le noyau d'azote 15 absorbe un noyau d'hydrogène ${}_1^1H$ (proton) pour former un noyau de carbone 12 en éjectant un noyau d'hélium 4 ${}_{\text{2}}^4He$ selon l'équation :
$${}_{\text{7}}^{15}\text{N} + {}_{\text{1}}^1\text{H} \rightarrow {}_{\text{6}}^{12}\text{C} + {}_{\text{2}}^4He (+ \gamma)$$

Lorsque le noyau de carbone 12 se désexcite, il émet un rayonnement gamma. Les six équations décrivent l'ensemble du cycle, dont l'équation globale s'écrit : $4 {}_{\text{1}}^1\text{H} \rightarrow {}_{\text{2}}^4He$

- **Groupe 2 :**

- Question 1 : Les particules émises lors des trois formes de désintégration présentées sont :
 - L'électron au cours de la désintégration β^- (doc.5) ;
 - Le positon (ou positron) au cours de la désintégration β^+ (doc.5) ;
 - Le noyau d'hélium au cours de la désintégration alpha.(doc.5).





- Question 2 : La réaction de fusion se produit entre deux noyaux de petite taille pour former un noyau plus gros. La réaction de fission se produit lorsqu'une particule (neutron, proton) entre en collision avec un gros noyau.
- Question 3 : La désintégration naturelle est un phénomène aléatoire, spontané, inéluctable et indépendante des conditions extérieures. Elle se produit à tout moment, et dans un échantillon de matière qui contient des noyaux radioactifs, on ne peut pas prévoir combien et quels noyaux vont se désintégrer.
Il existe trois types de désintégration :
 - *La désintégration β^-* : un noyau qui contient trop de neutrons se transforme en un autre noyau (autre élément chimique). Un neutron transmute en proton, en éjectant un électron. Le noyau fils contient donc un proton de plus que le noyau père, mais autant de nucléons.
 - *La désintégration β^+* : un noyau qui contient trop de protons se transforme en un autre noyau (autre élément chimique). Un proton transmute en neutron, en éjectant un positon. Le noyau fils contient donc un proton de moins que le noyau père, mais autant de nucléons.
 - *La désintégration α* : un noyau qui contient trop de nucléons se transforme en un autre noyau (autre élément chimique). Il éjecte un noyau d'hélium 4. Le noyau fils contient donc deux protons de moins et quatre nucléons de moins que le noyau père.

Ces réactions libèrent de l'énergie.

Une réaction provoquée est une réaction nucléaire qui nécessite un apport d'énergie pour se produire.

Il existe deux types de réactions provoquées : la fission et la fusion.

- La fission consiste à casser un gros noyau en le bombardant avec des particules (neutron ou proton), pour former deux noyaux fils plus petits.
- La fusion consiste à réunir deux petits noyaux, lorsqu'ils entrent en collision.
- Question 4 : Le phosphore 30 est un noyau radioactif dont la demi-vie est de 3 min 15 s (document 7). La demi-vie correspond à la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégré (voir activité 2 par 15). On peut en déduire qu'au bout de 3 min 15 s, la population de phosphore 30 aura été divisée par 2, et qu'en quelques heures, il n'y aura plus (ou très peu), de noyaux de phosphore 30 sur Terre. Ainsi, on en déduit que cet élément n'existe pas dans la nature car sa demi-vie est trop courte.

• Groupe 3 :

- Question 1 : Pour déterminer les valeurs d'abondance relative des éléments dans l'Univers qui sont plus abondants que le silicium, il faut exploiter le document 8, qui présente le nombre de noyaux (noté n) en fonction de Z (numéro atomique) pour les éléments chimiques présents dans l'Univers. Ce diagramme donne les valeurs de l'abondance relative par rapport à une population de 10^6 noyaux de silicium.

Les graduations, selon l'axe des ordonnées, ne sont pas assez précises car l'échelle



utilisée n'est pas orthonormée (il n'existe pas un intervalle régulier entre deux graduations successives).

Les valeurs seront donc données avec une certaine imprécision et on ne choisira que les éléments chimiques dont l'abondance relative est supérieure à 10^6 (celle du silicium).

Par exemple, l'abondance relative du noyau d'hydrogène est de l'ordre de 5×10^{10} par rapport à une population de 10^6 noyaux de silicium.

On peut donc compléter de la même façon un tableau avec les valeurs des éléments les plus abondants dans l'Univers en lisant les valeurs graphiques.

| Élément chimique | Symbole de l'élément | Abondance relative |
|------------------|----------------------|--------------------|
| Hydrogène | H | 5×10^{10} |
| Hélium | He | 5×10^9 |
| Carbone | C | 1×10^7 |
| Azote | N | 3×10^6 |
| Oxygène | O | 5×10^7 |
| Néon | Ne | 3×10^6 |

Tous les autres éléments sont moins abondants que le silicium.

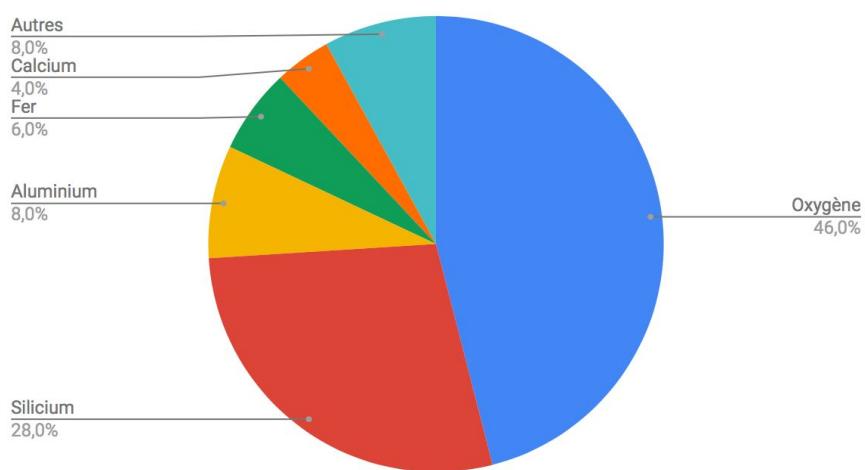
- Question 2 : Le diagramme circulaire est tracé en utilisant la correspondance de chaque pourcentage massique (pour la croûte terrestre) ou concentration relative (pour le sol lunaire) avec l'angle du diagramme. Un angle de 360° correspond à un pourcentage de 100%. Un angle α correspond à un pourcentage p. Pour déterminer l'angle, on applique donc la relation : $\alpha = \frac{p \cdot 360}{100}$

■ Pour la croûte terrestre :

| Élément chimique | Pourcentage massique | Angle ($^\circ$) |
|------------------|----------------------|--------------------|
| | 100 | 360° |
| | p | α |
| Oxygène | 46 | 165,6 |
| Silicium | 28 | 100,8 |
| Aluminium | 8 | 28,8 |
| Fer | 6 | 21,6 |
| Calcium | 4 | 14,4 |
| Autres | 8 | 28,8 |

Le diagramme circulaire correspondant est tracé ci-dessous :

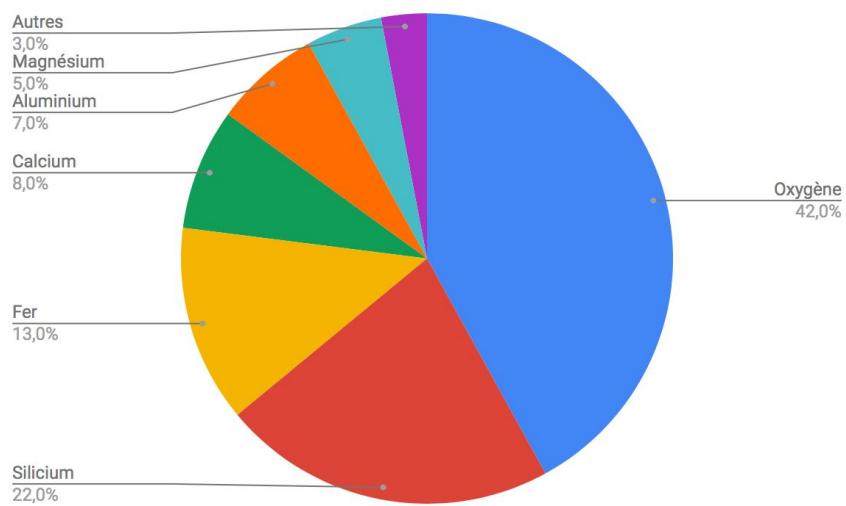
Pourcentage massique



■ Pour le sol lunaire :

| Élément chimique | Concentration relative | Angle ($^{\circ}$) |
|------------------|------------------------|----------------------|
| | 100 | 360° |
| | p | α |
| Oxygène | 42 | 151,2 |
| Silicium | 22 | 79,2 |
| Fer | 13 | 46,8 |
| Calcium | 8 | 28,8 |
| Aluminium | 7 | 25,2 |
| Magnésium | 5 | 18 |
| Autres | 3 | 10,8 |

Le diagramme circulaire correspondant est tracé ci-dessous :



- Question 3 : Pour comparer l'abondance des éléments chimiques dans les différents domaines, on peut par exemple se limiter à ceux dont l'abondance est supérieure à 5% (ceci est un choix, totalement arbitraire) et citer les principaux éléments.
Alors que l'Univers est principalement composé d'hydrogène et d'hélium (l'oxygène et le carbone sont environ 100 fois moins abondants), la croûte terrestre est constituée principalement d'oxygène, de silicium, d'aluminium et de fer, le monde du vivant d'oxygène, de carbone et d'hydrogène et le sol lunaire d'oxygène, de silicium, de fer, de calcium, d'aluminium et de magnésium.

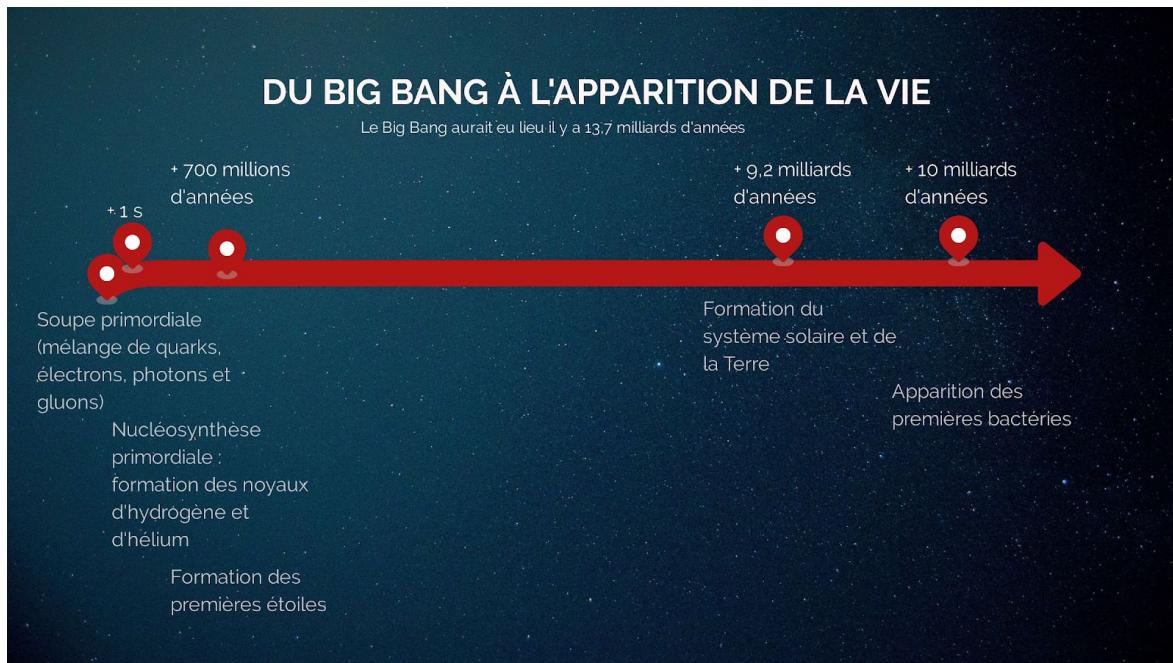
On peut résumer ces conclusions dans un tableau :

| Domaine | Principaux éléments chimiques |
|------------------|---|
| Univers | Hydrogène et hélium |
| Croûte terrestre | Oxygène, silicium, aluminium et fer |
| Monde du vivant | Oxygène, de carbone et d'hydrogène |
| Sol lunaire | Oxygène, silicium, fer, calcium, aluminium et magnésium |



- **Groupe 4 :**

- Question 1 : La frise chronologique présentée ci-dessous représente les principales étapes depuis le Big Bang jusqu'à l'apparition de la vie, sans souci d'échelle.



(Infographie réalisée avec *genially*).

- Question 2 : Pour que la vie apparaisse il est nécessaire que plusieurs conditions soient vérifiées. Chacune des conditions est liée à une raison expliquée ci-dessous :
- La planète doit être rocheuse, car la vie ne pourrait pas se développer sur une planète gazeuse. Il faut un support solide pour le développement de la vie.
 - La température doit y être clémente, car les bactéries vivent à des températures comprises entre 0 °C et 70 °C. Leur croissance est généralement idéale à 37 °C. Les écarts ne doivent pas être trop grands (jour/nuit, saisons), pour que la croissance reste optimale.
 - La gravité doit être ni trop importante ni trop faible, pour que les éléments chimiques puissent rester sur la planète, être attirés (par la force de gravitation), mais aussi pour permettre le mouvement. Sinon les éléments chimiques ne resteraient pas sur la planète, et partiraient dans l'espace, ou seraient tous « agglutinés » les uns aux autres, empêchant tout mouvement.
 - Sans atmosphère, la température sur une planète varierait beaucoup, et serait inférieure à zéro (de l'ordre de -15 °C) la nuit. L'atmosphère permet l'effet de serre, c'est-à-dire que les rayonnements provenant des étoiles sont en partie piégés et permettent d'avoir une température clémente.



- La présence d'eau liquide, car les bactéries se développent avec de l'eau (liquide) et non solide (elles sont emprisonnées dans la glace et ne se développent plus).

Ressource complémentaire :

- Pour en apprendre davantage sur la classe puzzle (jigsaw), vous trouverez un descriptif assez détaillé de sa mise en place par un professeur d'Histoire :
<https://educavox.fr/formation/la-classe-puzzle-collaborer-pour-ecrire-le-cours>
- Et un article wikipedia sur Jigsaw classroom : https://fr.wikipedia.org/wiki/Jigsaw_classroom

Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Les éléments chimiques dans la Galaxie

Compétence principalement travaillée : Produire et analyser différentes représentations graphiques de l'abondance des éléments chimiques (proportions) dans l'Univers, la Terre, les êtres vivants.

Correction :**1.**

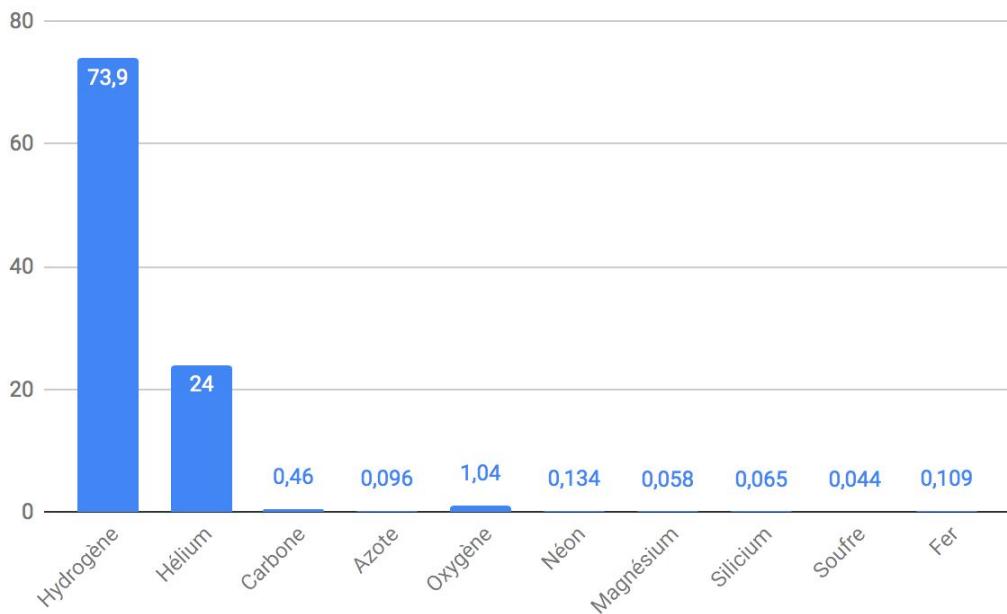
| Numéro atomique Z | 1 | 2 | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 26 |
|---------------------|-----------|---------|---------|-------|---------|-------|-----------|----------|--------|-------|
| Élément | Hydrogène | Hélium | Carbone | Azote | Oxygène | Néon | Magnésium | Silicium | Soufre | Fer |
| Concentration (ppm) | 739 000 | 240 000 | 4 600 | 960 | 10 400 | 1 340 | 580 | 650 | 440 | 1 090 |
| Pourcentage | 73,9 | 24,0 | 0,46 | 0,096 | 1,04 | 0,134 | 0,058 | 0,065 | 0,044 | 0,109 |

L'abondance est donnée en ppm, partie par million, c'est à dire que cela représente le nombre d'atomes pour un million d'atomes.

Par exemple, le pourcentage en hydrogène est : $p(\text{hydrogène}) = \frac{739\,000}{1\,000\,000} = 0,739$ soit 73,9 % .



2. Le diagramme en bâtons est représenté ci-dessous :



En abscisse, les différents éléments chimiques.

La hauteur du « bâton » est proportionnelle à l'abondance de l'élément, en ppm.

Exercice 2 : Isotopes de l'hydrogène

Compétence principalement travaillée : L'équation d'une réaction nucléaire stellaire étant fournie, reconnaître si celle-ci relève d'une fusion ou d'une fission.

Correction :

1. L'écriture conventionnelle d'un noyau est ${}^A_Z X$, avec Z le numéro atomique, A le nombre de masse, et X son symbole. Z correspond au nombre de protons qui se trouvent dans le noyau. A correspond au nombre de nucléons qui se trouvent dans le noyau. Si on note N le nombre de neutrons, on peut écrire $A = Z + N$. On peut donc calculer le nombre de neutrons dans le noyau par la formule : $N = A - Z$.

2. Des isotopes sont des noyaux qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de masse différent. L'hydrogène a trois isotopes, qui ont donc tous les trois le même nombre de protons. D'après l'écriture conventionnelle du noyau d'un atome de deutérium ${}^2_1 H$ (ou de tritium ${}^3_1 H$), on en déduit que l'hydrogène a pour numéro atomique $Z = 1$. L'atome d'hydrogène contient par ailleurs un électron dans le nuage électronique.

Le noyau de l'hydrogène 1 a pour écriture conventionnelle ${}^1_1 H$. On a $Z = 1$ et $A = 1$, ce noyau ne possède qu'un nucléon. Il est composé d'un seul proton, et ne possède pas de neutron. En effet, $N = A - Z = 1 - 1 = 0$.

Le noyau du deutérium (ou hydrogène 2) a pour écriture conventionnelle ${}^2_1 H$. On a donc $Z = 1$ et $A = 2$, soit deux nucléons. Le noyau est donc composé d'un seul proton, et d'un neutron. En effet, $N = A - Z = 2 - 1 = 1$.



Le noyau du tritium (ou hydrogène 3) a pour écriture conventionnelle 3_1H . On a donc $Z = 1$ et $A = 3$, soit trois nucléons. Le noyau est donc composé d'un seul proton, et de deux neutrons. En effet, $N = A - Z = 3 - 1 = 2$.

3. Une réaction de fusion est une réaction nucléaire qui se produit entre deux noyaux de petites tailles qui s'agglomèrent ensemble pour former un noyau plus gros. La réaction **b** correspond donc bien à une réaction de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium. La réaction aboutit à la formation d'un noyau d'hélium 4, et à l'éjection d'un neutron.

La réaction **a** est une réaction de désintégration (naturelle) au cours de laquelle un noyau de tritium se désintègre pour former l'hélium 3 et un électron (il s'agit d'une désintégration β^-).

Exercice 3 : Lecture d'une courbe de décroissance

Compétence principalement travaillée : Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie.

Correction :

1. Pour déterminer l'activité des trois isotopes de l'iode au moment de l'accident, on lit sur le graphique les valeurs de l'activité à la date de l'accident, soit le 11/03/2011. L'activité est donnée en ordonnée à la date $t = 0$ (jour).

On lit :

$$A(\text{iode } 131) = 90 \times 10^{15} \text{ Bq}$$

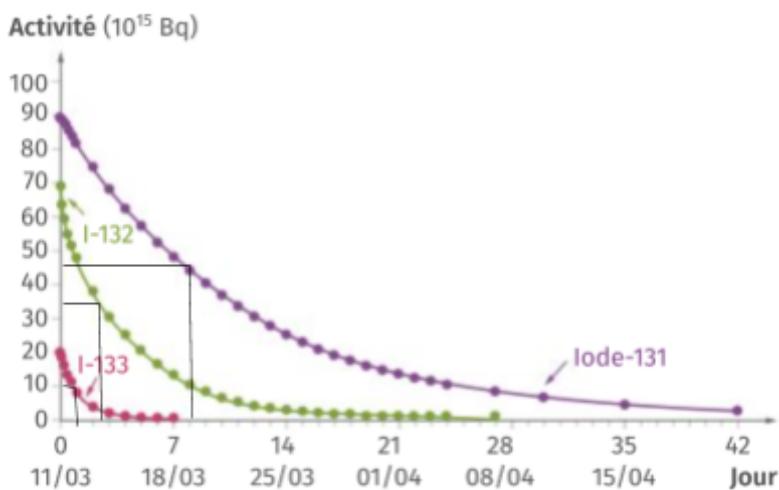
$$A(\text{iode } 132) = 70 \times 10^{15} \text{ Bq}$$

$$A(\text{iode } 133) = 20 \times 10^{15} \text{ Bq}$$

2. La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée.

L'énoncé explique que l'activité est proportionnelle au nombre d'atomes (radioactifs).

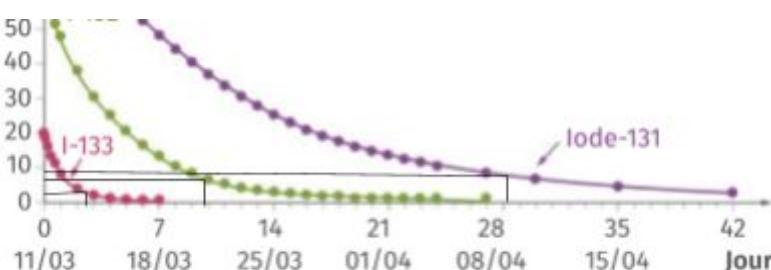
Pour déterminer la demi-vie de chacun des isotopes de l'iode, il faut donc déterminer graphiquement la durée nécessaire pour que l'activité de l'échantillon soit divisée par deux.





- Pour l'iode 131 :
 $A(\text{iode } 131) = \frac{90}{2} \times 10^{15} \text{Bq} = 45 \times 10^{15} \text{Bq}$ le 19 mars.
La demi-vie de l'iode 131 est donc d'environ 8 jours.
- Pour l'iode 132 : $A(\text{iode } 132) = \frac{70}{2} \times 10^{15} \text{Bq} = 35 \times 10^{15} \text{Bq}$ le 13 mars. La demi-vie de l'iode 132 semble donc être d'environ 3 jours. En réalité, elle est de 2,3 heures. On ne peut donc pas la déterminer sur cette courbe, avec ces graduations. Mais cependant, l'iode 132 se désintègre très rapidement en tellure 132, et c'est la courbe de décroissance du tellure 132 qui est donnée, dont la demi-vie correspond à environ 3 jours (elle est précisément de 3,2 jours d'après la littérature).
- Pour l'iode 133 : $A(\text{iode } 133) = \frac{20}{2} \times 10^{15} \text{Bq} = 10 \times 10^{15} \text{Bq}$ le 12 mars. La demi-vie de l'iode 133 est donc d'environ 1 jour (elle est précisément de 20,8 heures).

3. Pour déterminer la durée au bout de laquelle l'activité est inférieure à 10% de l'activité initiale, il faut lire graphiquement l'abscisse du point de la courbe dont l'ordonnée vaut 10% de l'activité initiale.



- Pour l'iode 131 : on a une activité de 9 Bq à partir du 9 avril, soit 29 jours après l'accident.
- Pour l'iode 132 (et son noyau-fils, le tellure 132) : on a une activité de 7 Bq à partir du 21 mars, soit 10 jours après l'accident.
- Pour l'iode 133 : on a une activité de 2 Bq à partir 13 mars (ou 14 mars), soit 2 ou 3 jours après l'accident.

Donc, l'activité de ces différents éléments est inférieure à 10% de l'activité initiale à partir de 2 ou 3 jours pour l'iode 133, 10 jours pour l'iode 132 et son noyau fils, et après 29 jours pour l'iode 131.

4.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : Réaction triple alpha

Compétence principalement travaillée : Reconnaître une réaction nucléaire.

Correction :

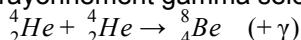
1. L'écriture conventionnelle d'un noyau est ${}^A_Z X$, avec Z le numéro atomique, A le nombre de masse, et X son symbole. Z correspond au nombre de protons qui se trouvent dans le noyau. A correspond au nombre de nucléons qui se trouvent dans le noyau. Si on note N le nombre de neutrons, on peut écrire $A = Z + N$. On peut donc calculer le nombre de neutrons dans le noyau par la formule : $N = A - Z$.



- Le numéro atomique de l'hélium est $Z_{He} = 2$, donc le noyau d'hélium 4 contient 2 protons et $N = 4 - 2 = 2$ neutrons. Il contient au total 4 nucléons (2 protons et 2 neutrons).
- Le numéro atomique de beryllium est $Z_{Be} = 4$, donc le noyau de beryllium 8 contient 4 protons et $N = 8 - 4 = 4$ neutrons. Il contient au total 8 nucléons (4 protons et 4 neutrons).
- Le numéro atomique du carbone est $Z_C = 6$, donc le noyau de carbone 12 contient 6 protons et $N = 12 - 6 = 6$ neutrons. Il contient au total 12 nucléons (6 protons et 6 neutrons).

2. La réaction triple-alpha est constituée de deux réactions successives :

- Réaction entre deux noyaux d'hélium 4 pour former un noyau de beryllium 8, et émission d'un rayonnement gamma selon l'équation :



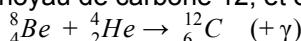
Remarque hors programme :

On remarque qu'au cours de cette transformation nucléaire :

- Le nombre de charges est conservé : $2 + 2 = 4$
- Le nombre de masse est conservé : $4 + 4 = 8$

Ce sont les lois de Soddy.

- Réaction entre un noyaux de beryllium 8 et un noyau d'hélium 4 pour former un noyau de carbone 12, et émission d'un rayonnement gamma selon l'équation :



Remarque hors programme :

On remarque qu'au cours de cette transformation nucléaire :

- Le nombre de charges est conservé : $4 + 2 = 6$
- Le nombre de masse est conservé : $8 + 4 = 12$

3. Ces deux réactions nucléaires sont des réactions de fusion : deux petits noyaux s'agglomèrent pour former un noyau plus gros.

Exercice 5 : Abondance des éléments dans la croûte terrestre

Compétence principalement travaillée : Produire des représentations graphiques de l'abondance des éléments.

Correction :

1. Pour identifier les trois éléments chimiques majoritaires dans la croûte terrestre, il faut identifier les éléments chimiques dont la concentration (en mg/kg) est la plus élevée.

Les trois éléments chimiques sont :

- L'oxygène (461 000 mg/kg)
- Le silicium (277 000 mg/kg)
- L'aluminium (81 300 mg/kg)

2. Dans le tableau, on trouve la concentration des dix principaux éléments chimiques contenus dans la croûte terrestre. Pour réaliser le diagramme circulaire, il faut d'abord évaluer la composition massique en pourcentage de ces dix éléments. La somme totale des concentrations donne $C = 986$ 600 mg/kg (ce qui est très proche de 1 kg).





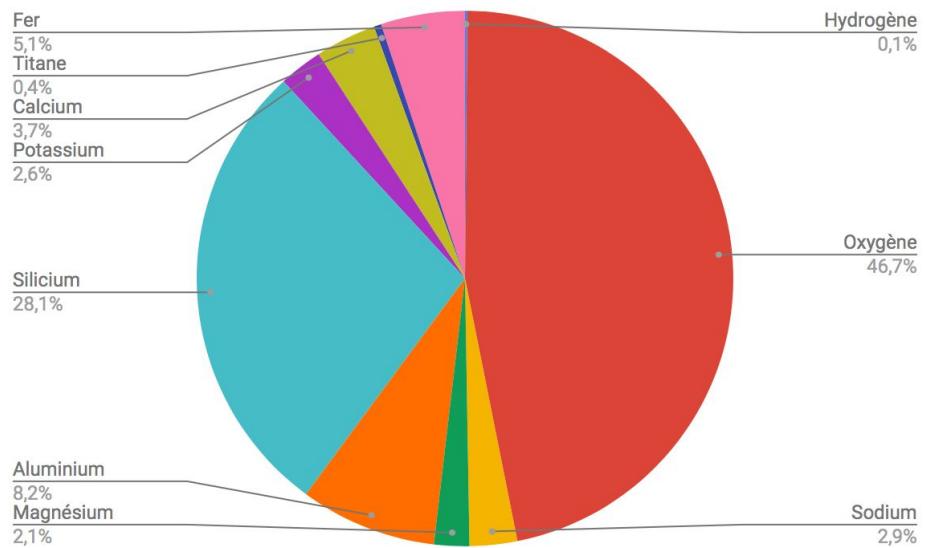
Le pourcentage p se calcule par la relation : $p = \frac{c \text{ (mg/kg)}}{1\ 000\ 000 \text{ (mg/kg)}} \times 100$

Le diagramme circulaire est ensuite tracé en utilisant la correspondance de chaque pourcentage massique avec l'angle du diagramme. Un angle de 360° correspond à un pourcentage de 100%. Un angle α correspond à un pourcentage p . Pour déterminer l'angle, on applique donc la relation : $\alpha = \frac{p \cdot 360}{100}$.

| Élément | Concentration (mg/kg) | Composition massique (pourcentage) | Angle ($^\circ$) |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|
| Somme des concentrations | 986 600 | 100 | 360° |
| | | p | α |
| Hydrogène | 1 400 | 0,14 | 0,5 |
| Oxygène | 461 000 | 46,1 | 166,0 |
| Sodium | 28 300 | 2,83 | 10,2 |
| Magnésium | 20 900 | 2,09 | 7,5 |
| Aluminium | 81 300 | 8,13 | 29,3 |
| Silicium | 277 000 | 27,7 | 99,7 |
| Potassium | 26 000 | 2,6 | 9,4 |
| Calcium | 36 300 | 3,63 | 13,1 |
| Titane | 4 400 | 0,44 | 1,6 |
| Fer | 50 000 | 5 | 18,0 |



Le diagramme circulaire est tracé ci-dessous :



3. Les éléments chimiques qui se trouvent sur Terre et plus généralement sur les planètes et les satellites ont été généralement créés dans les étoiles ou au moment de leur explosion.

Exercice 6 : Datation au carbone 14

Compétence principalement travaillée : Utiliser une décroissance radioactive pour une datation.

Correction :

1. La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée. La demi-vie du carbone 14 est $t_{1/2} = 5\ 730\ ans$ (donnée de l'énoncé).

Informations complémentaires : L'activité de l'échantillon est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon. L'activité correspond au nombre de désintégrations qui se produisent en une seconde et s'exprime en becquerel (Bq). Dans le cas du morceau de charbon, ce sont les noyaux de carbone 14 qui, en se désintégrant, émettent des rayonnements que l'on peut compter, et qui mesurent l'activité.

L'activité de l'échantillon nous permet d'estimer la durée qui s'est écoulée depuis que ce morceau de bois a été coupé, car elle est proportionnelle au nombre d'atomes de carbone 14 restant au moment de la découverte.

L'activité mesurée permet d'estimer que le nombre d'atomes de carbone 14 est 16 fois plus faible qu'à sa formation. On peut estimer la durée qui s'est écoulée depuis la formation du charbon car chaque fois qu'il s'écoule $t_{1/2} = 5\ 730\ ans$, le nombre de noyaux de carbone 14 est divisé par deux.

Si on note N_0 le nombre de noyaux de carbone 14 au moment de la formation du morceau de bois, on a :

$$N = \frac{N_0}{2} \text{ au bout de } t_{1/2} = 5\ 730\ ans$$

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{N_0}{2} \right) = \frac{N_0}{4} \text{ au bout de } 2t_{1/2} = 2 \times 57300\ ans = 11\ 460\ ans$$



$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{N_0}{\frac{1}{4}} \right) = \frac{N_0}{\frac{8}{1}} \text{ au bout de } 3 t_{1/2} = 3 \times 5\,730 \text{ ans} = 17\,190 \text{ ans}$$
$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{N_0}{\frac{1}{8}} \right) = \frac{N_0}{\frac{16}{1}} \text{ au bout de } 4 t_{1/2} = 4 \times 5\,730 \text{ ans} = 22\,920 \text{ ans}$$

Le morceau de charbon a donc environ 23 000 ans.

4.3. Le coin des experts

Exercice 7 : Réactions nucléaires en chaîne

Compétence principalement travaillée : Reconnaître une réaction nucléaire.

Correction :

1. Sur le diagramme du document 2, la grandeur représentée en abscisses est N, qui correspond au nombre de neutrons (appelé nombre de masse), et celle représentée en ordonnées est Z, qui correspond au nombre de protons (appelé numéro atomique).
2. La composition d'un noyau fils dépend du mode de désintégration à partir d'un même noyau père.

- *Désintégration de type α :*
 - Le noyau fils contient 2 neutrons de moins et 2 protons de moins, soit 4 nucléons de moins que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z - 2)$ protons et $(A - 4)$ nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^{A-4}_{Z-2} Y$.
- *Désintégration de type β^- :*
 - Le noyau fils contient 1 neutron de moins et 1 proton de plus, soit autant de nucléons que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z + 1)$ protons et A nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^{A+1}_{Z+1} Y$.
- *Désintégration de type β^+ :*
 - Le noyau fils contient 1 neutron de plus et 1 proton de moins, soit autant de nucléons que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z - 1)$ protons et A nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^{A-1}_{Z-1} Y$.



3. Les équations de désintégration s'écrivent :

- *Désintégration de type α :*
 - ${}_{Z}^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$. La particule émise lors de cette désintégration est un noyau d'hélium 4.
- *Désintégration de type β^- :*
 - ${}_{Z}^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e^-$. La particule émise lors de cette désintégration est un électron.
- *Désintégration de type β^+ :*
 - ${}_{Z}^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_{1}^0 e^+$. La particule émise lors de cette désintégration est un positon.

4. L'écriture conventionnelle du plutonium 244 est ${}_{94}^{244} Pu$ car, d'après les données de l'énoncé, son numéro atomique est $Z = 94$ et son symbole « Pu ».

- D'après le document 1, le plutonium 244 suit une désintégration de type α . Le noyau fils contient donc 2 protons de moins : il s'agit de l'uranium dont le numéro atomique est 92. Le noyau fils contient 2 neutrons de moins, et donc 4 nucléons de moins au final. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}_{92}^{240} U$
 - L'équation de la désintégration est donc : ${}_{94}^{244} Pu \rightarrow {}_{92}^{240} U + {}_2^4 He$
- Le noyau d'uranium 240 est radioactif et suit une désintégration de type β^- . Le noyau fils contient donc 1 proton de plus : il s'agit du neptunium dont le numéro atomique est 93. Le noyau fils contient 1 neutron de moins, soit autant de nucléons. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}_{93}^{240} Np$
 - L'équation de la désintégration est donc : ${}_{92}^{240} U \rightarrow {}_{93}^{240} Np + {}_{-1}^0 e^-$
- Le noyau de neptunium 240 est radioactif et suit une désintégration de type β^- . Le noyau fils contient donc 1 proton de plus : il s'agit du plutonium dont le numéro atomique est 94. Le noyau fils contient 1 neutron de moins, soit autant de nucléons. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}_{94}^{240} Pu$
 - L'équation de la désintégration est donc : ${}_{93}^{240} Np \rightarrow {}_{94}^{240} Pu + {}_{-1}^0 e^-$
- Le noyau de plutonium 240 est radioactif et suit une désintégration de type α . Le noyau fils contient donc 2 protons de moins : il s'agit de l'uranium dont le numéro atomique est 92. Le noyau fils contient 2 neutrons de moins, soit 4 nucléons de moins. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}_{92}^{236} U$
 - L'équation de la désintégration est donc : ${}_{94}^{240} Pu \rightarrow {}_{92}^{236} U + {}_2^4 He$

L'énoncé n'indique pas si l'uranium 236 est radioactif. Il suit une désintégration de type α mais comme sa demi-vie est de 23,42 millions d'années, on peut raisonnablement considérer qu'il est stable.



Exercice 8 : La chaîne proton-proton

Compétence principalement travaillée : Établir une équation nucléaire.

Correction :

1. Le deutérium est un isotope de l'hydrogène, son numéro atomique est donc $Z = 1$. Comme le noyau contient deux nucléons, d'après l'énoncé, on en déduit que $A = 2$. Le noyau est donc composé d'un seul proton, et d'un neutron. En effet, $N = A - Z = 2 - 1 = 1$. Le noyau du deutérium a donc pour écriture conventionnelle 2_1H .

L'écriture conventionnelle du noyau d'hydrogène est 1_1H , et on peut aussi le noter « p », car le noyau ne contient qu'un proton.

L'équation de la réaction qui se produit au cours de la première étape entre deux protons, pour former un noyau de deutérium est donc : ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^A_ZX$

Pour satisfaire les lois de conservation, il faut qu'il y ait :

- Conservation du nombre de charges : $1 + 1 = 1 + Z$, soit $Z = 1$,
- Conservation du nombre de masse : $1 + 1 = 2 + A$, soit $A = 0$.

La particule émise contient donc une charge positive, mais n'a pas de masse (puisque $A = 0$). Il s'agit d'un positon, antiparticule de l'électron, que l'on écrit : ${}^0_1e^+$.

L'équation de la première étape s'écrit donc : ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^0_1e^+$

2. Au cours de la deuxième étape, un proton fusionne avec un noyau de deutérium pour former un noyau d'hélium 3. Le numéro atomique de l'hélium est $Z = 2$, il contient 3 nucléons ; l'écriture conventionnelle de son noyau est donc : 3_2He

L'équation de la réaction s'écrit : ${}^1_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He$

Les lois de conservation sont bien vérifiées :

- Conservation du nombre de charges : $1 + 1 = 2$,
- Conservation du nombre de masse : $1 + 1 = 2$.

3. Au cours de la dernière étape, deux noyaux d'hélium réagissent pour former le noyau d'hélium 4 en libérant deux protons. L'équation de la réaction s'écrit : ${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^1_1H$

Les lois de conservation sont bien vérifiées :

- Conservation du nombre de charges : $2 + 2 = 2 + 2 \times 1$,
- Conservation du nombre de masse : $3 + 3 = 4 + 2 \times 1$.

4. L'équation de la réaction globale s'écrit en combinant les trois équations :

- Première étape : ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^0_1e^+$
- Deuxième étape : ${}^1_1H + {}^2_1H \rightarrow {}^3_2He$
- Troisième étape : ${}^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^1_1H$





Pour obtenir deux noyaux d'hélium 3 nécessaires à la troisième étape, il faut d'abord combiner les étapes 1 et 2 qui permettent d'obtenir, à partir de trois protons, un noyau d'hélium 3 :

- Première étape : ${}^1H + {}^1H \rightarrow {}^2H + {}^0e^+$
- Deuxième étape : ${}^1H + {}^2H \rightarrow {}^3He$
- Soit : ${}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^2H \rightarrow {}^2H + {}^0e^+ + {}^3He$
Qui s'écrit après simplification : ${}^1H + {}^1H + {}^1H \rightarrow {}^0e^+ + {}^3He$

Pour obtenir deux noyaux d'hélium 3, on combine deux fois ces étapes, puis on les combine avec la troisième étape :

- ${}^1H + {}^1H + {}^1H \rightarrow {}^0e^+ + {}^3He$
 - ${}^1H + {}^1H + {}^1H \rightarrow {}^1e^+ + {}^3He$
 - ${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2 {}^1H$
- Qui s'écrit :
 ${}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^3He + {}^3He \rightarrow {}^0e^+ + {}^3He + {}^0e^+ + {}^3He + {}^4He + 2 {}^1H$ et
donc, après simplification, on obtient une réaction globale :
 ${}^1H + {}^1H + {}^1H + {}^1H \rightarrow 2 {}^0e^+ + {}^4He$
Cette équation globale correspond à la chaîne proton-proton.

4.4. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 2 : Isotopes de l'hydrogène niveau Initiés (seulement dans le manuel numérique)

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé et le même document que dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux initiés et non plus aux apprentis.

Compétence principalement travaillée : Reconnaître une réaction nucléaire.

Questions :

1. Quelle est l'écriture conventionnelle du noyau d'un atome X ? Donnez la signification et le nom de toutes les lettres utilisées.
2. Rappelez la définition du terme « isotopes ».
3. Le noyau d'hydrogène 1, dont l'écriture conventionnelle est 1H , est l'isotope de l'hydrogène le plus abondant sur Terre. Donnez la composition de son noyau.
4. Il existe deux autres isotopes de l'hydrogène : le deutérium 2H et le tritium 3H . Donnez la composition de leurs noyaux.
5. La réaction de fusion aboutit à la formation d'un noyau d'hélium 4 et d'un neutron. Écrivez l'équation de la réaction nucléaire qui pourrait se produire au cœur des futures centrales à fusion.



**Correction :**

1. L'écriture conventionnelle d'un noyau est ${}^A_Z X$, avec Z le numéro atomique, A le nombre de masse, et X son symbole. Z correspond au nombre de protons qui se trouvent dans le noyau. A correspond au nombre de nucléons qui se trouvent dans le noyau. Si on note N le nombre de neutrons, on peut écrire $A = Z + N$. On peut donc calculer le nombre de neutrons dans le noyau par la formule : $N = A - Z$.

2. Des isotopes sont des noyaux qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de masse différent.

3. D'après l'écriture conventionnelle du noyau d'un atome d'hydrogène ${}^1_1 H$, on en déduit que l'hydrogène a pour numéro atomique $Z = 1$ et un nombre de masse $A = 1$, soit 1 nucléon. Le noyau est donc constitué d'un proton et de $N = 1 - 1 = 0$ neutron.

4. Le noyau du deutérium (ou hydrogène 2) a pour écriture conventionnelle ${}^2_1 H$. On en déduit que $Z = 1$ (c'est un isotope de l'hydrogène, donc il contient le même nombre de protons que l'hydrogène 1) et $A = 2$, soit deux nucléons. Le noyau est donc composé d'un seul proton, et d'un neutron. En effet, $N = A - Z = 2 - 1 = 1$.

Le noyau du tritium (ou hydrogène 3) a pour écriture conventionnelle ${}^3_1 H$. On en déduit que $Z = 1$ (c'est un isotope de l'hydrogène, donc il contient le même nombre de protons que l'hydrogène 1) et $A = 3$, soit trois nucléons. Le noyau est donc composé d'un seul proton, et de deux neutrons. En effet, $N = A - Z = 3 - 1 = 2$.

5. Une réaction de fusion est une réaction nucléaire qui se produit entre deux noyaux de petites tailles qui s'agglomèrent ensemble pour former un noyau plus gros. La réaction de fusion s'écrit donc :
$${}^2_1 H + {}^3_1 H \rightarrow {}^4_2 He + {}^1_0 n$$

Remarque hors programme :

On remarque qu'au cours de cette transformation nucléaire :

- Le nombre de charges est conservé : $1 + 1 = 2 + 0$
- Le nombre de masse est conservé : $2 + 3 = 4 + 1$

Ce sont les lois de Soddy.

Sources :

- Sujet original (site Labolycée)
<http://labolycee.org/2005/2005-Afrique-Sujet-Exo1-Hydrogene-7pts.pdf>

Exercice 4 : Réaction triple-alpha niveau Experts (seulement dans le manuel numérique)

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé et le même document que dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux experts et non plus aux initiés.

Compétence principalement travaillée : Reconnaître une réaction nucléaire.



Questions :

1. Écrivez les équations de réactions nucléaires qui permettent de transformer l'hélium 4 en carbone 12 et indiquez de quel type de réaction il s'agit.

2. Expliquez pourquoi cette réaction porte le nom « triple alpha ».

Données : numéros atomiques des noyaux d'hélium, de beryllium et de carbone $Z_{He} = 2$; $Z_{Be} = 4$; $Z_C = 6$

Correction :

1. L'écriture conventionnelle d'un noyau est ${}^A_Z X$, avec Z le numéro atomique, A le nombre de masse, et X son symbole. Z correspond au nombre de protons qui se trouvent dans le noyau. A correspond au nombre de nucléons qui se trouvent dans le noyau. Si on note N le nombre de neutrons, on peut écrire $A = Z + N$. On peut donc calculer le nombre de neutrons dans le noyau par la formule : $N = A - Z$.

Le numéro atomique de l'hélium est $Z_{He} = 2$, donc le noyau d'hélium 4 contient 2 protons et $N = 4 - 2 = 2$ neutrons. Il contient au total 4 nucléons (2 protons et 2 neutrons). L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}^4_2 He$

Le numéro atomique de beryllium est $Z_{Be} = 4$, donc le noyau de beryllium 8 contient 4 protons et $N = 8 - 4 = 4$ neutrons. Il contient au total 8 nucléons (4 protons et 4 neutrons). L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}^8_4 Be$

Le numéro atomique du carbone est $Z_C = 6$, donc le noyau de carbone 12 contient 6 protons et $N = 12 - 6 = 6$ neutrons. Il contient au total 12 nucléons (6 protons et 6 neutrons). L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}^{12}_6 C$

La réaction triple-alpha est constituée de deux réactions successives :

Réaction entre deux noyaux d'hélium 4 pour former un noyau de beryllium 8, et émission d'un rayonnement gamma selon l'équation : ${}^4_2 He + {}^4_2 He \rightarrow {}^8_4 Be + \gamma$

Remarque hors programme :

On remarque qu'au cours de cette transformation nucléaire :

- Le nombre de charges est conservé : $2 + 2 = 4$
- Le nombre de masse est conservé : $4 + 4 = 8$

Ce sont les lois de Soddy.

Puis il y a réaction entre un noyau de beryllium 8 et un noyau d'hélium 4 pour former un noyau de carbone 12, et émission d'un rayonnement gamma selon l'équation : ${}^8_4 Be + {}^4_2 He \rightarrow {}^{12}_6 C + \gamma$

Remarque hors programme :

On remarque qu'au cours de cette transformation nucléaire :

- Le nombre de charges est conservé : $4 + 2 = 6$
- Le nombre de masse est conservé : $8 + 4 = 12$

Ces deux réactions nucléaires sont des réactions de fusion : deux petits noyaux s'agglomèrent pour former un noyau plus gros.

2. Les deux équations de réactions s'écrivent :



- ${}^4_2He + {}^4_2He \rightarrow {}^8_4Be + \gamma$
- ${}^8_4Be + {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C + \gamma$

On peut donc écrire, en les combinant : ${}^4_2He + {}^4_2He + {}^8_4Be + {}^4_2He \rightarrow {}^8_4Be + {}^{12}_6C$

Ce qui globalement s'écrit, en simplifiant : $3 {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C$

C'est l'agglomération entre eux de trois noyaux d'hélium (particule alpha), qui forment le carbone 12.

Exercice 7 : Réactions nucléaires en chaîne niveau Initiés (seulement dans le manuel numérique)

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé et le même document que dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux initiés et non plus aux experts.

Compétence principalement travaillée : Reconnaître une réaction nucléaire.

Questions :

1. Indiquez les grandeurs représentées en abscisses et en ordonnées du diagramme.

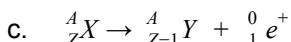
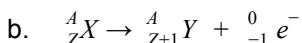
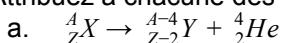
2. Associez à chaque type de désintégration, le noyau fils formé, et justifiez.

1. Désintégration de type α a. ${}^A_{Z-1}Y$

2. Désintégration de type β^- b. ${}^A_{Z+1}Y$

3. Désintégration de type β^+ c. ${}^{A-4}_{Z-2}Y$

3. Attribuez à chacune des équations le type de désintégration qui lui correspond et justifiez :



4. Le plutonium 244 a été identifié dans des météorites anciennes, laissant penser qu'il a été créé au cours de la formation du système solaire. C'est un élément radioactif qui peut se désintégrer. Le noyau fils obtenu peut à son tour se désintégrer. La chaîne de désintégration permet d'obtenir un isotope stable. Le tableau présente quelques-uns des isotopes de la chaîne de désintégration. Complétez les équations de désintégration de quelques noyaux radioactifs issus de la désintégration du plutonium 244.



**Correction :**

1. Sur le diagramme du document 2, la grandeur représentée en abscisses est N, qui correspond au nombre de neutrons (appelé nombre de masse), et celle représentée en ordonnées est Z, qui correspond au nombre de protons (appelé numéro atomique).

2. Selon le mode de désintégration, le noyau fils a une composition différente du noyau père. Le noyau père contient Z protons et N neutrons, soit $A = Z + N$ nucléons.

- *Désintégration de type α :*
 - Le noyau fils contient 2 neutrons de moins et 2 protons de moins, soit 4 nucléons de moins que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z - 2)$ protons et $(A - 4)$ nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^{A-4}_{Z-2} Y$.
- *Désintégration de type β^- :*
 - Le noyau fils contient 1 neutron de moins et 1 proton de plus, soit autant de nucléons que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z + 1)$ protons et A nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^A_{Z+1} Y$.
- *Désintégration de type β^+ :*
 - Le noyau fils contient 1 neutron de plus et 1 proton de moins, soit autant de nucléons que le noyau père.
 - Le noyau fils contient donc $(Z - 1)$ protons et A nucléons.
 - L'écriture conventionnelle du noyau père est : ${}^A_Z X$.
 - L'écriture conventionnelle du noyau fils est : ${}^A_{Z-1} Y$.

3. Les équations de désintégration s'écrivent :

- *Désintégration de type α :*
 - ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 He$. La particule émise lors de cette désintégration est un noyau d'hélium 4.
- *Désintégration de type β^- :*
 - ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^-$. La particule émise lors de cette désintégration est un électron.
- *Désintégration de type β^+ :*
 - ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+$. La particule émise lors de cette désintégration est un positon.

4. L'écriture conventionnelle du plutonium 244 est ${}^{244}_{94} Pu$ car, d'après les données de l'énoncé, son numéro atomique est Z = 94 et son symbole « Pu ».

- D'après le document 1, le plutonium 244 suit une désintégration de type α . Le noyau fils contient donc 2 protons de moins : il s'agit de l'uranium dont le numéro atomique est 92. Le noyau fils contient 2 neutrons de moins, soit 4 nucléons de moins. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : ${}^{240}_{92} U$



- L'équation de la désintégration est donc : $^{244}_{94}Pu \rightarrow ^{240}_{92}U + ^4_2He$
- Le noyau d'uranium 240 est radioactif et suit une désintégration de type β^- . Le noyau fils contient donc 1 proton de plus : il s'agit du neptunium dont le numéro atomique est 93. Le noyau fils contient 1 neutron de moins, soit autant de nucléons. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : $^{240}_{93}Np$
 - L'équation de la désintégration est donc : $^{240}_{92}U \rightarrow ^{240}_{93}Np + ^0_{-1}e^-$
- Le noyau de neptunium 240 est radioactif et suit une désintégration de type β^- . Le noyau fils contient donc 1 proton de plus : il s'agit du plutonium dont le numéro atomique est 94. Le noyau fils contient 1 neutron de moins, soit autant de nucléons. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : $^{240}_{94}Pu$
 - L'équation de la désintégration est donc : $^{240}_{93}Np \rightarrow ^{240}_{94}Pu + ^0_{-1}e^-$
- Le noyau de plutonium 240 est radioactif et suit une désintégration de type α . Le noyau fils contient donc 2 protons de moins : il s'agit de l'uranium dont le numéro atomique est 92. Le noyau fils contient 2 neutrons de moins, soit 4 nucléons de moins. L'écriture conventionnelle de son noyau est donc : $^{236}_{92}U$
 - L'équation de la désintégration est donc : $^{240}_{94}Pu \rightarrow ^{236}_{92}U + ^4_2He$

L'énoncé n'indique pas si l'uranium 236 est radioactif. Il suit une désintégration de type α mais comme sa demi-vie est de 23,42 millions d'années, on peut donc raisonnablement considérer qu'il est stable.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique - 1ère

Chapitre 2 : Des édifices ordonnés : les cristaux

Introduction

Présentation

Ce chapitre vise à revenir sur l'organisation de la matière depuis l'échelle atomique jusqu'aux échelles macroscopiques ;

Il s'agit en particulier d'identifier la structure des cristaux et quelques conditions de leur mise en place pour comprendre leur diversité au sein du monde minéral et du monde vivant.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

- Notions d'atome, de molécules et les représentations conventionnelles correspondantes ;
- Les différents types de liaisons chimiques.

Bibliographie

- Lardeaux, Gauthier et Al., *Comprendre et enseigner la planète Terre*, Édition Ophrys.
- Pons J-C., *La pétro sans peine*, Tomes 1 et 2, Édition Crdp de Grenoble.
- Beaux J-F., *Atlas de pétrographie*, Édition Dunod.

Sitographie

- <http://www.librairie demolecules.education.fr/outils/minusc/app/minusc.htm>
Librairie de molécules.
- <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/mineraux-et-ressources-minerales>
Minéraux et ressources minérales, Eduterre.
- <http://www.crgp.cnrs-nancy.fr/index.php>
Site du Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques.

Idées pour des activités supplémentaires

- Visite de musées de Minéraux et Fossiles ;
- Rencontre avec un gemmologue et ou un joaillier.



Activité 1 : Des réseaux cristallins singuliers (documentaire)

1.1. Généralités

Cette activité a pour but de présenter la notion de maille cristalline.

Le lien au programme :

- Cette activité présente les deux types de mailles monoatomiques au programme : la maille cubique simple (CS) et la maille cubique à face centrées (CFC) ;
- Les savoir-faire importants concernant les mailles sont présentés ici : calcul du nombre d'atome par maille, calcul de compacité, lien entre paramètre de maille et rayon atomique et finalement calcul de masse volumique à partir des caractéristiques des mailles ;
- La perspective cavalière est utilisée pour représenter les mailles et peut aussi faire l'objet d'une présentation plus détaillée.

Durée : 1 heure pour réaliser l'intégralité de l'activité ; 35 min si on divise la classe en deux avec comme consigne d'étudier un seul type de maille.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- L'activité se base sur les notions élémentaires de géométrie dans l'espace : calcul de longueurs et de volumes ;
- Si un besoin spécifique de travail sur ces notions est nécessaire, on peut aussi travailler sur le livret mathématique en complément de l'activité.

1.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Photographie de l'atomium de Bruxelle.
- **Document 2** : Document de présentation de la structure cubique simple. Ce document présente le modèle des sphères dures : c'est un point essentiel pour la compréhension et la maîtrise du modèle de la maille cristalline.
- **Document 3** : Présentation des éléments de géométrie de la structure cubique simple.
- **Document 4** : Ce document présente la notion d'empilement compact : c'est l'empilement de sphères qui laisse le moins d'espace inoccupé. Dans les faits il en existe deux : l'empilement ABC qui donne lieu à la maille CFC, et l'empilement AB qui donne lieu à une maille hexagonale compacte. La maille hexagonale compacte n'est pas au programme.
- **Document 5** : Présentation des éléments de géométrie de la structure cubique à faces centrées.



**Ressource complémentaire :**

- Il existe une troisième structure cubique, beaucoup plus répandue que la structure cubique simple : la structure cubique centrée. Vous pouvez retrouver une activité numérique sur cette structure au lien : LLS.fr/ES1P29.

1.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Une maille cubique simple comporte 8 atomes à chaque sommet de la maille. Un atome situé au sommet d'une maille compte pour $\frac{1}{8}$ (il est partagé entre 8 mailles). On compte donc $8 \times \frac{1}{8} = 1$ atome par maille cubique simple.

Question 2 : Dans la maille cubique simple, deux atomes sont tangents le long d'une arête de la maille. On a donc la relation suivante : $2R = a$.

Question 3 : Le volume d'une maille cubique est a^3 . Dans le modèle de la maille cristalline, les atomes ont une forme de sphère et le volume d'une sphère de rayon R est $\frac{4}{3}\pi R^3$.

D'après la question 1, il y a 1 atome par maille, donc $C = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{a^3}$. Or $a = 2R$. Soit finalement

$c = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{(2R)^3} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{8R^3} = \frac{\pi}{3 \times 2} = \frac{\pi}{6} \approx 0,52$. La maille cubique simple n'est donc pas compacte.

Question 4 : Une maille cubique à face centrée comporte 8 atomes à chaque sommet de la maille. Un atome situé au sommet d'une maille compte pour $\frac{1}{8}$ (il est partagé entre 8 mailles). Une maille cubique à face centrée comporte 6 atomes au centre de chaque face de la maille. Un atome situé sur une face compte pour $\frac{1}{2}$ (il est partagé entre 2 mailles).

On compte donc $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$ atomes par maille CFC.

Question 5 : D'après le schéma du plan de compacité de la maille CFC, 2 moitiés d'atomes et un atome entier sont tangents le long d'une diagonale de la maille CFC. Soit $d = 4R$.

D'après la formule de Pythagore dans les triangles rectangles : $d = \sqrt{a^2 + a^2} = \sqrt{2a^2} = \sqrt{2} a$.

Question 6 : Le volume d'une maille est a^3 . Dans le modèle de la maille cristalline, les atomes ont une forme de sphère et le volume d'une sphère de rayon R est $\frac{4}{3}\pi R^3$.

D'après la question 4, il y a 4 atomes par maille, donc $C = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{a^3}$. Or $a = 2\sqrt{2}R$. Soit

$c = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{(2\sqrt{2}R)^3} = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{8 \times 2\sqrt{2}R^3} = \frac{\pi}{3 \times \sqrt{2}} \approx 0,74$

La maille cubique à face centrées est donc compacte.

Remarque : ce calcul littéral peut être assez complexe à réaliser. Une possibilité pour les élèves les plus en difficulté est de simplement réaliser la simplification des R^3 puis de faire le calcul à l'aide de la calculatrice. Il risque alors d'y avoir un certain nombre d'erreurs, cela peut être l'occasion de rebondir sur l'utilisation de la calculatrice et de la manière dont il faut taper les calculs.



Question 7 : On rappelle la formule de la masse volumique ρ d'un échantillon de masse m_{maille} et de volume V :

L'or cristallise dans une structure CFC, il y a donc 4 atomes d'or par maille, soit $m_{maille} = 4 \times m$. Le volume d'une maille est $V = a^3$. Soit $a = \sqrt[3]{V}$.

$$V = \frac{m_{maille}}{\rho} \quad \text{soit} \quad a = \sqrt[3]{\frac{4 \times m}{\rho}}$$

Finalement

Il faut bien penser à convertir les grandeurs dans des unités homogènes : on convertit donc m en kg.

$$m = 3,27 \times 10^{-22} \text{ g} = 3,27 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

Attention ! ρ est en g.L^{-1} , donc a sera exprimé en dm.

$$a = \sqrt[3]{\frac{3,27 \times 10^{-25}}{19,3}} = 4,08 \times 10^{-9} \text{ dm} = 4,08 \times 10^{-10} \text{ m}$$



Activité 2 : Le chlorure de sodium, un sel parmi tant d'autres (documentaire)

2.1. Généralités

Après avoir vu des cristaux monoatomiques, cette activité aborde les cristaux ioniques.

Le lien au programme :

- Ici, on cherche à remobiliser les connaissances sur les mailles : volume, compacité, nombre d'éléments par maille.
- Cette activité permet aussi de réaliser le tracé de mailles en respectant les conventions de la perspective cavalière.

Durée : 30 minutes.

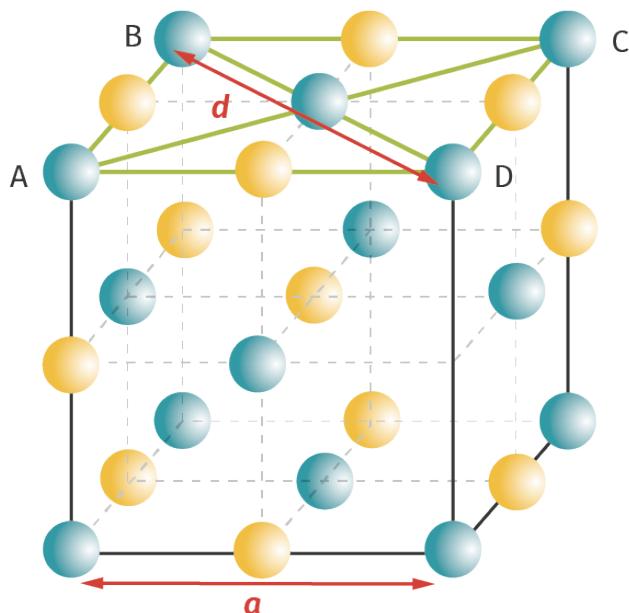
2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Document de présentation du sel gemme.
- **Document 2** : Document donnant les caractéristiques de la maille NaCl pour son tracé.

2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 :



Question 2 : On compte tout d'abord le nombre d'ions Cl⁻ dans la maille :

- 8 ions Cl⁻ situés sur les sommets de la maille.
- 6 ions Cl⁻ situées au centre chaque face.

Cela représente donc :

$$8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4 \text{ ions Cl}^- \text{ par maille.}$$

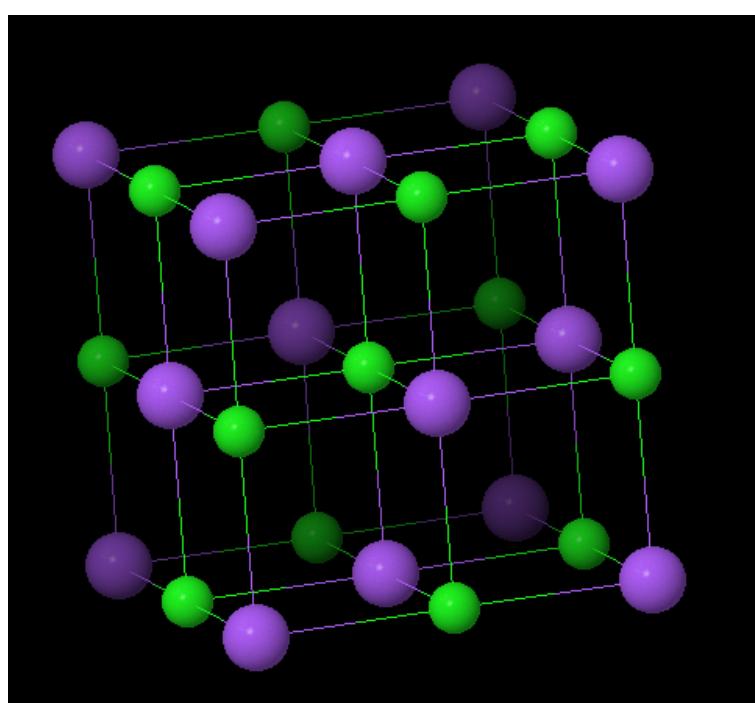
On compte ensuite les ions Na⁺ :

- 1 atome au centre de la maille
- 12 atomes situés au milieu des arêtes.

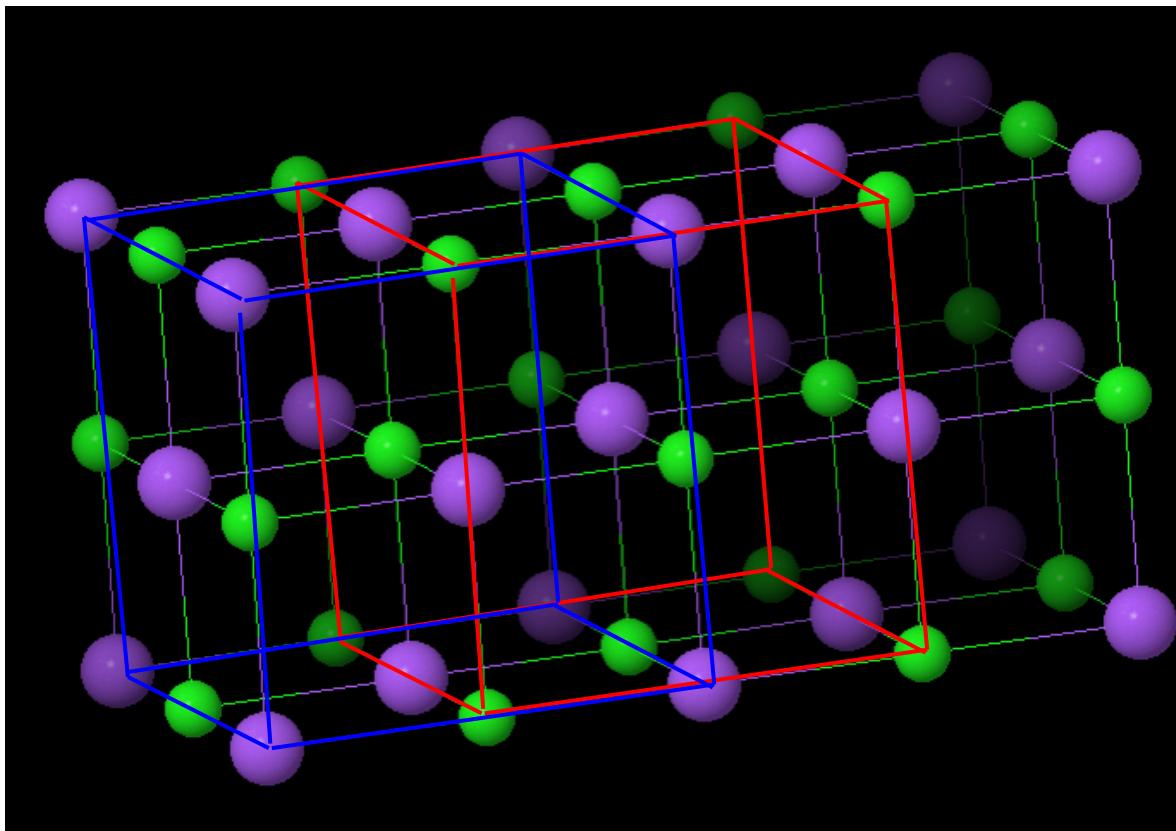
Cela représente donc : $1 + 12 \times \frac{1}{4} = 4 \text{ ions Na}^+ \text{ par maille.}$

Il y a autant d'ions possédant une charge + que d'ions possédant une charge -, la maille est donc électriquement neutre.

Question 3 : Représentation de la maille NaCl : Les ions Cl⁻ sont en vert, les ions Na⁺ sont en violet :



Représentation de deux mailles NaCl accolées :



On a fait apparaître la maille CFC des ions Na^+ en bleu, la maille CFC des ions Cl^- en rouge.

2.4. Protocoles et résultats expérimentaux

À 25°C, la quantité maximale de sel pouvant être dissout dans l'eau est d'environ 360 g de sel par litre d'eau.

Matériel :

- Bécher ;
- Agitateur magnétique ;
- Barreau aimanté ;
- Sel.

Protocole :

- Placer un bécher contenant le volume d'eau choisi sur un agitateur magnétique avec un barreau aimanté ;
- Ajouter progressivement du sel en maintenant l'agitation ;
- Lorsque le sel ajouté ne se dissout plus, vérifier que la quantité de sel ajoutée correspond bien à la saturation ;
- Filtrer la solution obtenue pour éliminer l'excès de sel.



Résultats attendus / documents de secours :



Après une dizaine de jours, vous pourrez voir apparaître de beaux cristaux cubiques.

Conseil : Pour obtenir les cristaux les plus gros possibles, assurez-vous de placer votre solution saturée dans un endroit où elle ne sera pas agitée.



Activité 3 : Une cristallisation sous conditions (documentaire)

3.1. Généralités

Il s'agit pour les élèves de découvrir ce qui distingue cristal et minéral, et qu'un même minéral peut cristalliser sous différentes formes suivant les conditions de pression et température. Alors ses propriétés macroscopiques seront différentes.

Liens au programme :

Un composé de formule chimique donnée peut cristalliser sous différents types de structures qui ont des propriétés macroscopiques différentes. Ainsi les minéraux se caractérisent par leur composition chimique et leur organisation cristalline.

Compétences : Extraire des informations et les comparer ; utiliser des logiciels de modélisation.

Durée : 30 minutes.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Communiquer par écrit par des phrases ou des modes de représentation scientifiques.

3.2. Présentation des documents

Document d'appel : Échantillons, photographies, documents des trois silicates d'alumines évoqués et ou du graphite et du diamant en affirmant que les formules chimiques ont les mêmes et faire réagir les élèves en demandant ce qui explique les différences d'aspect, de propriétés, etc.

Présentation des documents :

- **Document 1 :** Les photographies permettent de découvrir, décrire et comparer les 3 minéraux et de repérer leurs conditions de formations sur le diagramme. De relier aussi profondeur et pression.
- **Document 2 :** Il présente les 7 systèmes cristallins, de retrouver ceux des minéraux du document 1 (ou ceux présentés en situation d'appel). Ce document permet de lancer l'activité de recherche sur le lien « Minusc » pour une partie pratique.

Ressources complémentaires :

- Pour réaliser les activités de modélisation :
 - La librairie de molécules : <http://www.librairiedemolecules.education.fr/outils/minusc/> ;
 - *Minéraux et ressources minérales*, Eduterre : <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/mineraux-et-ressources-minerales> ;
 - American Mineralogist Crystal Structure Database : <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/minerals/>

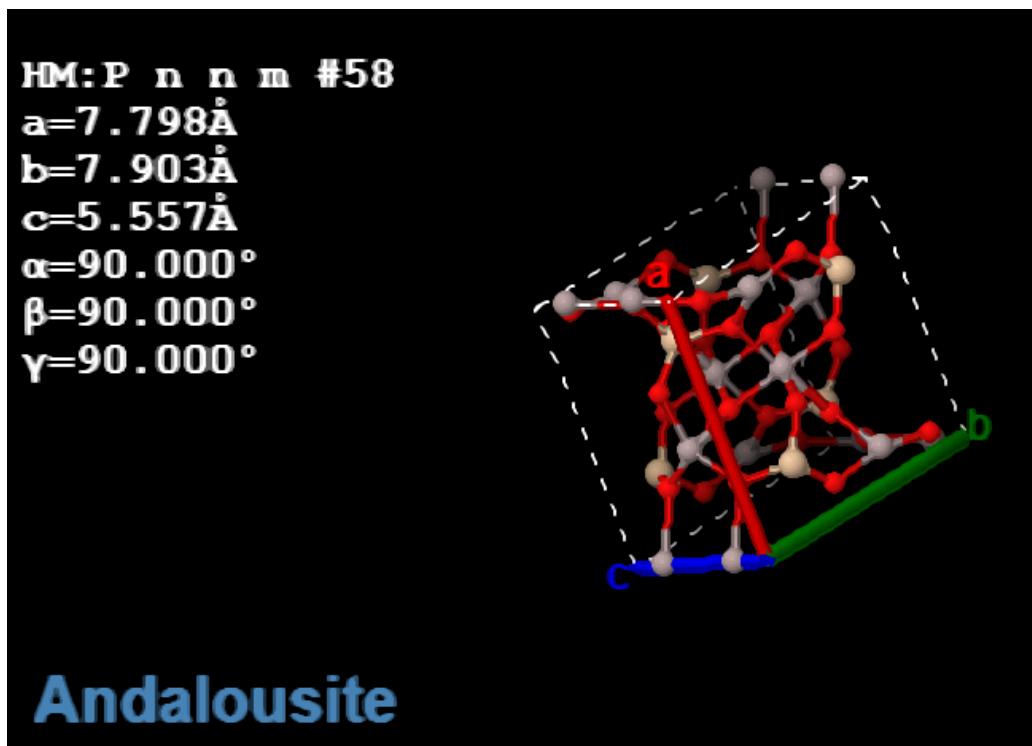


3.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 :

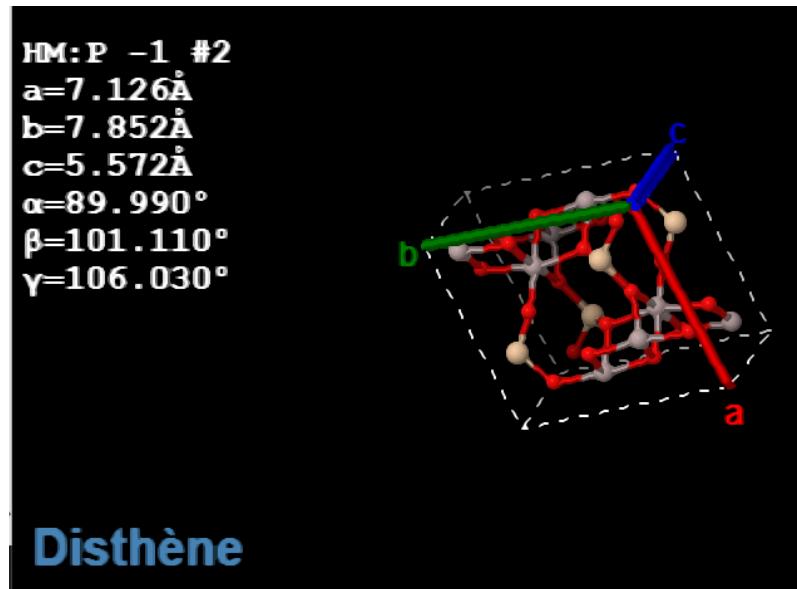
| Critères/Minéral | Disthène | Andalousite | Sillimanite |
|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Formule chimique | Al_2SiO_5 | Al_2SiO_5 | Al_2SiO_5 |
| Couleur (sur la photo) | Bleue | Brune | Bleue / violette |
| Aspect/forme du cristal | Baguette fibreuse | Baguette prismatique | Baguette translucide |
| Système cristallin | (À découvrir dans le TP numérique) | (À découvrir dans le TP numérique) | (À découvrir dans le TP numérique) |

Question 2 : Paramètres de maille donnés sur minusc pour l'andalousite :



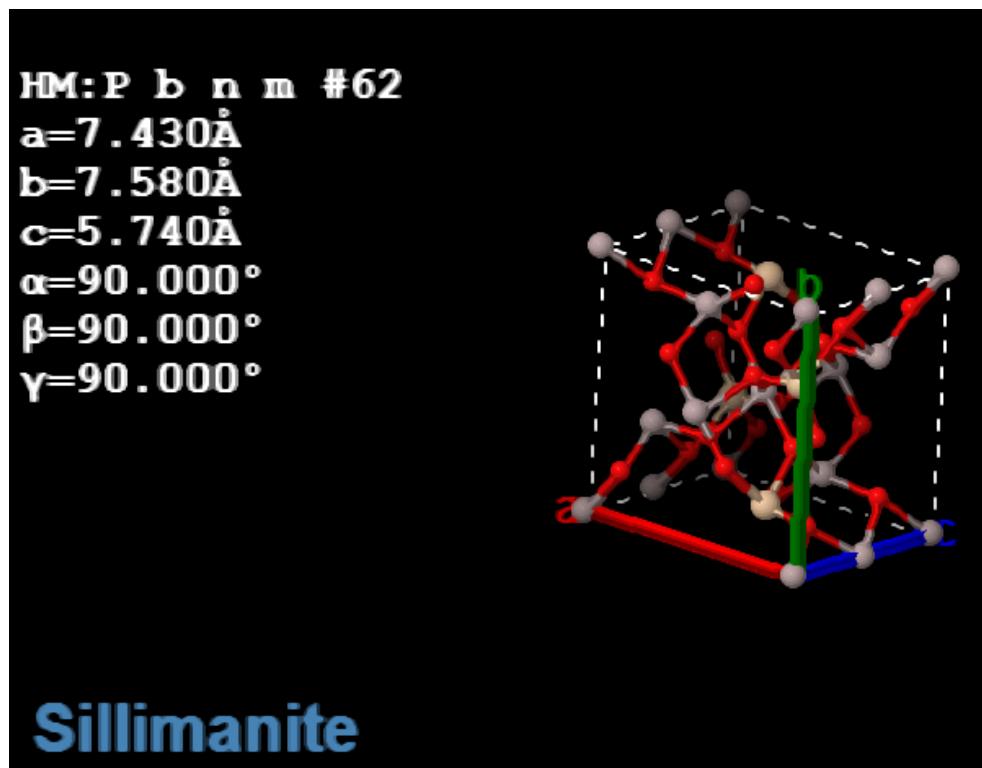
$a \neq b \neq c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ l'organisation cristalline de l'andalousite est donc orthorhombique.

Paramètres de maille donnés sur minusc pour le disthène :



$a \neq b \neq c$ et $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ l'organisation cristalline du disthène est donc triclinique.

Paramètres de maille donnés sur minusc pour la sillimanite :



$a \neq b \neq c$ et $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ l'organisation cristalline de la sillimanite est donc orthorhombique.

Question 3 : Pour une même formule chimique, les atomes peuvent s'organiser différemment dans l'espace suivant les conditions de pression et température ; Il en résulte alors qu'un même composé pour cristallier dans différents systèmes cristallins. Les minéraux et par conséquent les cristaux formés auront alors des propriétés différentes.

3.4. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Ordinateur avec connexion internet.

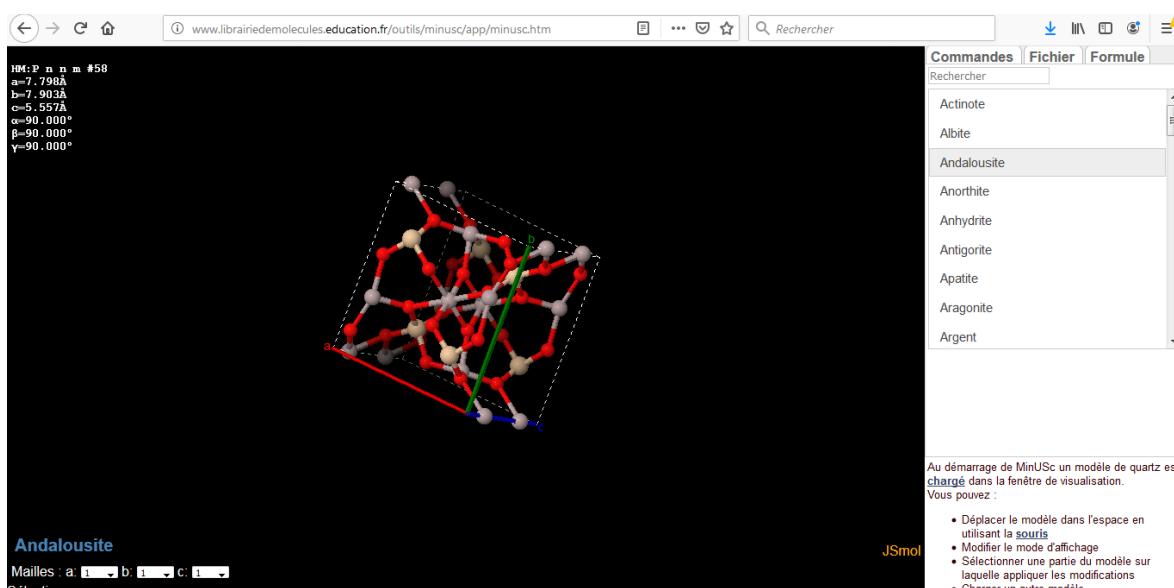
Protocole :

- Se rendre sur :
<http://www.librairiedemolecules.education.fr/outils/minusc/app/minusc.htm> ;
- Choisir dans l'onglet de droite « fichier » le minéral recherché (ex : Andalousite) ;
- Orienter le cristal pour l'observer suivant un angle favorable en maintenant enfoncé le bouton droit de la souris ;
- Repérer les a , b et c ainsi que leur valeur et la valeur des angles α , β et γ ;
- Retrouver à partir de celles-ci le système cristallin du composé étudié (voir document 2).

Résultats attendus / documents de secours :

Ci-dessous le résultat pour l'andalousite, du système orthorhombique :

**a=7.798 Å
b=7.903 Å
c=5.557 Å
α=90.000°
β=90.000°
γ=90.000°**





Activité 4 : De la roche au squelette, les cristaux sont partout ! (documentaire)

4.1. Généralités

Cette activité permet de passer de l'échelle du cristal à celle de la roche et de comprendre qu'une roche est un ensemble de minéraux ; (voire de cristaux dans le cas d'une roche entièrement cristallisée). Elle permet également d'étendre au monde du vivant en présentant quelques exemples de cristaux dans les êtres vivants.

Liens avec le programme : Une roche est formée de l'association de cristaux d'un même minéral ou de plusieurs minéraux. Des structures cristallines existent aussi dans les organismes biologiques (coquille, squelette, calcul rénal, etc.)

Compétences :

Distinguer, en termes d'échelle et d'organisation spatiale, maille, cristal, minéral, roche.
Observer et communiquer ses résultats par des schémas

Durée : 30 minutes.

4.2. Présentation des documents

Document d'appel : Un échantillon de cristal de roche...et cette question aux élèves : Cristal ou roche ?

ou

« Il y aurait dans certains végétaux de petits cristaux qui leur permettent de se défendre contre les herbivores, etc. »

=> Liens possible avec une activité pratique complémentaire au document pour observer des cristaux dans les cellules végétales de peau d'échalote ou autres raphides dans les cellule de misère, etc.

Présentation des documents :

- **Document 1 :** Deux exemples de roches les plus représentatives de la croûte continentale (granite et calcaire) présentées aux différentes échelles (du micro au macro) en y précisant les formules chimiques des minéraux qui les constituent.
- **Document 2 :** Photographies aux échelles macro et micro pour identifier la nature des cristaux de calcite et établir un lien avec le document 1 ;
(Attention, la légende « CAL » n'est plus visible sur le cliché remplaçant celui initialement proposé).

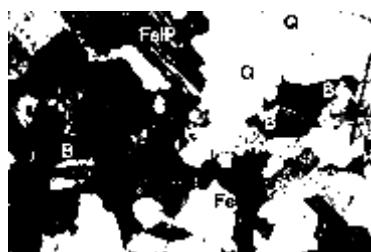
Idées en plus :

Échantillons de granite et de calcaire coquillier, lames minces correspondantes et microscope polarisant. Coquille d'huître.

Peau d'échalote, lame et lamelle, pour repérer des raphides : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-anatomie-vegetale-microscope-781/page/15/>

4.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Schéma obtenu à l'aide du logiciel Mesurim à partir de la photographie d'origine. Il s'agit de souligner l'imbrication des minéraux et de réussir à les identifier par des légendes. (en particulier en complétant avec une observation à la loupe et au microscope) :



Question 2 : Le granite est composé de 3 minéraux principaux (quartz, feldspaths orthose et plagioclase, biotite).

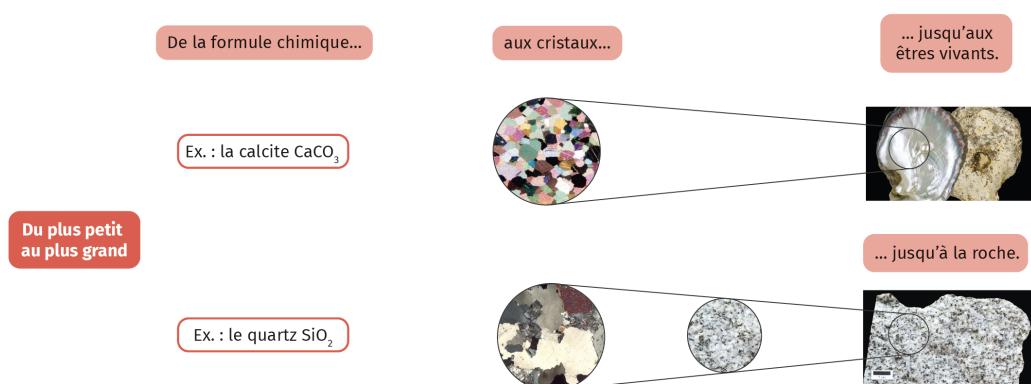
Ces minéraux ont tous une formule chimique différente (doc. 1) et sont eux -même différents des minéraux rencontrés dans une roche calcaire. (docs. 1 et 2).

La roche calcaire est en effet constituée essentiellement de calcite. (CaCO_3) que l'on retrouve au microscope et qui constitue la coquille des organismes fossilisés (doc. 1) et actuels (doc. 2).

La calcite peut prendre différentes formes (sparitique, calcitique, fibreuse)

On en conclut que ces deux roches sont constituées de minéraux qui apparaissent sous forme de cristaux au microscope.

Les cristaux constituent donc les roches et aussi dans certains êtres vivants.

Question 3 :



Activité 5 : Du verre dans certaines roches magmatiques (documentaire)

5.1. Généralités

L'activité vise à identifier les conditions de formation des cristaux, en particulier lors du refroidissement d'un magma. Alors suivant les conditions de refroidissement (température/vitesse) les minéraux ont le temps de cristalliser en solides de plus ou moins grande taille. Quand ce n'est pas le cas, se forme alors un solide amorphe appelé verre.

Les élèves auront à identifier les caractéristiques macroscopiques des deux roches magmatiques volcaniques.

Le choix des roches (rhyolite et obsidienne) s'inscrit dans la continuité de l'exemple du granite vu dans l'activité précédente. Ceci permettra aux élèves d'envisager le devenir d'un magma refroidissant vite en surface (comme les laves) ou plus lentement en profondeur (comme les plutons).

Liens avec le programme :

Dans le cas des solides amorphes, l'empilement d'entités se fait sans ordre géométrique. C'est le cas du verre. Certaines roches volcaniques contiennent du verre, issu de la solidification très rapide d'une lave.

Mettre en relation la structure amorphe ou cristalline d'une roche et les conditions de son refroidissement.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Mettre en œuvre un protocole ;
- Communiquer ses résultats par un compte rendu écrit ou oral.

Durée :

- 20 minutes ;
- 30 à 40 minutes si les activités pratiques sont mises en œuvre (observation au microscope polarisant et manipulation avec l'éthyl-vanilline).

5.2. Présentation des documents

Document d'appel : Vidéo d'éruption volcanique présentant des coulées de lave, échantillonées par des scientifiques.

Cette question peut être posée : « selon vous, que va devenir ce bout de lave ? que pourrait-on observer au microscope ? »

Recueillir les propositions avant d'entrer dans une démarche d'investigation incluant observations de roches volcaniques ainsi que la manipulation/modélisation avec l'éthyl-vanilline (Atelier / défi « Comment réussir à fabriquer des cristaux de différentes tailles »)

Présentation des documents :

- **Document 1 :** Trois photographies pour illustrer la diversité des roches obtenues à partir d'une même lave (on la définition est à relier à celle de magma).
- **Document 2 :** Détails au microscope polarisant des deux exemples de roches volcaniques choisies : rhyolite et obsidienne ; Il est pertinent ici de réinvestir l'exemple du granite).



- **Document 3** : Exemples de deux résultats obtenus après avoir refroidi de l'éthyl-vanilline lentement ou rapidement ; Ces deux clichés peuvent être présentés comme le résultat à obtenir par les élèves qui auraient à réaliser la manipulation et l'observation au microscope polarisant.

Ressources complémentaires :

- Pour retrouver des vidéos impressionnantes sur les prélèvements de laves :
https://www.maxisciences.com/lave/voila-comment-les-scientifiques-recoltent-des-echantillons-de-lave_art36121.html
- Pour retrouver des clichés de lames minces :
<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/biologie/photossql/photos.php?TopicID=Lames>

5.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Il est attendu que les élèves soulignent les différences de couleur, de texture (présence de minéraux ou non, perdus dans un fond plutôt homogène dans lequel rien n'est visible. A cette occasion peuvent être introduit les termes de microlithe et de verre et de la notion de texture (nécessaire pour répondre à la question 3)

Question 2 : Cette question est destinée à tester la capacité des élèves à émettre une hypothèse. Celle attendue ici peut être : « Un refroidissement rapide du magma est responsable de la formation de petits cristaux alors que le refroidissement lent permet la formation de gros cristaux ».

L'élève aura alors à justifier sa réponse en s'appuyant sur des éléments légendés issus des documents ou de ses observations qu'il aura sélectionné et préparé pour cette présentation (supports de communication orale)

Cette hypothèse peut être justifiée de la sorte « Quand l'éthyl vanilline liquide est refroidi rapidement (sur un support très froid) alors les cristaux qui se forment sont majoritairement de petite taille (moins de 1 mm) alors que leur taille dépasse 2 mm lors d'un refroidissement lent (sur un support à température ambiante). Ces gros cristaux apparaissent imbriqués.

La taille et la disposition des cristaux est très semblable dans le cas de la rhyolite et du granite (microlithes et/ou gros cristaux) ou de l'obsidienne (microlithes, rares et verre très présent).

On en déduit qu'un même magma peut produire une roche grenue ou microlithique (granite, rhyolite) quand il se refroidit lentement ou une roche vitreuse (obsidienne) quand il est refroidi rapidement.

Question 3 : En conclusion, la texture d'une roche reflète (entre autres) les conditions de sa formation. Ainsi, les minéraux sont des composés chimiques qui cristallisent suivant les conditions de leur environnement. Dans le cas du magma, un refroidissement rapide entraîne la formation d'une roche microlithique ou vitreuse. Si les minéraux n'ont pas du tout le temps de cristalliser, la roche est totalement vitreuse comme dans le cas des obsidiennes ;

Il est possible de compléter ou de prolonger cette conclusion par une réflexion sur le métamorphisme et les conditions de pression et température qui permettent d'obtenir différents minéraux (voir activité 3) et par extension de nouvelles roches, etc.



5.4. Protocoles et résultats expérimentaux

5.5.1. Groupe Apprentis

Matériel :

- 1 dispositif de chauffage (bec électrique) ;
- Cristaux d'éthyl-vanilline (la moitié d'un microtube) ;
- 2 lames de verre ;
- 2 lamelles ;
- 1 pince en bois ;
- 1 pointe lancéolée ou 1 scalpel ;
- 1 boîte de pétri contenant un fond d'eau congelée ;
- 1 microscope polarisant ;
- 1 paire de lunette ;
- 1 gant anti chaleur ;
- 1 hotte aspirante ou un environnement ventilé.

Protocole :

- À l'aide de la pointe du scalpel ou de la pointe lancéolée, déposer un peu de cristaux sur une lame ;
- Prendre un gant anti chaleur et saisir la lame avec la pince en bois ;
- À l'aide d'une pince en bois, faire délicatement chauffer la lame en la tenant horizontalement ;
- En quelques secondes, les cristaux fondent ;
- Retirez immédiatement la lame de la source de chaleur, puis recouvrez d'une lamelle. Exercez une légère pression sur la lamelle afin que la couche de vanilline liquide soit la plus fine possible ;
 - Pour un refroidissement rapide, la lame sera aussitôt placée sur le glaçon de la boîte à pétri ;
 - Pour un refroidissement lent, recommencer le protocole en laissant la lame à température ambiante durant 5 minutes après avoir placé la lamelle ;
- Quand les lames ont refroidi, les placer sous l'objectif du microscope polarisant (grossissement x40) et comparer la taille des cristaux ;
- La réalisation de clichés ou de courte vidéo peut être envisagée pour réaliser le bilan. Prévoir alors une caméra pour équiper le microscope.

Précautions : La manipulation demande de travailler dans le calme et de respecter les règles de sécurité (risque de brûlure, de coupure) et dans un environnement convenablement ventilé (risque de gêne respiratoire).

Résultats attendus / documents de secours : Voir photographies du manuel, page 33.

Exercices

6.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Les silicates d'alumine, témoins d'une histoire

Compétence principalement travaillée : Relier la structure d'une roche à des conditions physiques.

Correction :

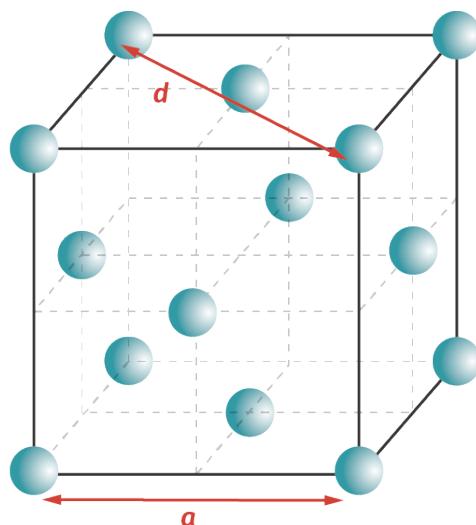
D'après le diagramme pression / température des silicates d'alumine, la sillimanite est formée dans des conditions de haute température et pression. C'est donc un minéral qui est formé en profondeur. Pour que le gneiss à sillimanite puisse être trouvé en surface, la roche a dû remonter auparavant, par exemple lors du chevauchement de deux plaques tectoniques.

Exercice 2 : Les deux structures cristallines courantes du fer

Compétence principalement travaillée : Calculer la masse volumique d'un cristal.

Correction :

1.



Dans une maille CFC, la tangence des atomes se fait le long des diagonales des faces. On a donc $4R = d$, or d'après la relation de Pythagore $d^2 = a^2 + a^2$ soit $d = \sqrt{2}a$ et donc finalement

$$4R = \sqrt{2}a \text{ puis } R = \frac{\sqrt{2}a}{4}.$$

$$R = \frac{\sqrt{2} \times 0,356 \times 10^{-9}}{4} = 1,26 \times 10^{-10}\text{m}$$

Le rayon d'un atome de fer est donc :



2. Le fer γ cristallise dans une structure CFC. Dans cette structure, il y a un atome par face de la maille (donc 6) ainsi qu'un atome par sommet de la maille (donc 8).

Il y a donc $N = 6 \times \frac{1}{2} + 8 \times \frac{1}{8} = 3 + 1 = 4$ atomes de fer.

La masse volumique ρ se calcule selon la formule $\rho_{Fe} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Fe}}{a^3}$;
 $\rho_{Fe} = \frac{4 \times 9,27 \times 10^{-26}}{(0,356 \times 10^{-9})^3} = 8,22 \times 10^3 \text{ kg}$.

Exercice 3 : CaCO₃ dans tous ses états ! Une affaire de système cristallin

Compétence principalement travaillée : Confronter des données nouvelles à ses connaissances.

Correction :

1. Pour ces deux minéraux, les paramètres de mailles sont tous différents. Ils ne cristallisent donc pas dans des réseaux cubiques.

2. Les coquilles des mollusques sont constituées de ces cristaux. Certaines espèces forment leur coquille d'aragonite, d'autres de calcite, et certaines utilisent les deux minéraux.

6.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : Un lingot d'or

Compétence principalement travaillée : Dénombrer les atomes par maille.

Correction :

1. $V = 52,5 \text{ mL} = 52,5 \times 10^{-3} \text{ L} = 52,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

$$\rho = \frac{1}{52,5 \times 10^{-6}} = 1,9 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$$

2. L'or cristallise dans une structure CFC. Une maille CFC comporte $N = 4$ atomes (voir cours).

La masse volumique ρ se calcule selon la formule $\rho = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Au}}{a^3}$

$$a^3 = \frac{N \times m_{Au}}{\rho} \quad \text{Donc} \quad a = \sqrt[3]{\frac{N \times m_{Au}}{\rho}}$$

Soit La tangence dans la maille CFC se fait selon la diagonale d'une face. On a donc la relation mathématique : $\sqrt{2}a = 4R$

$$m_{Au} = 3,27 \times 10^{-22} \text{ g} = 3,27 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

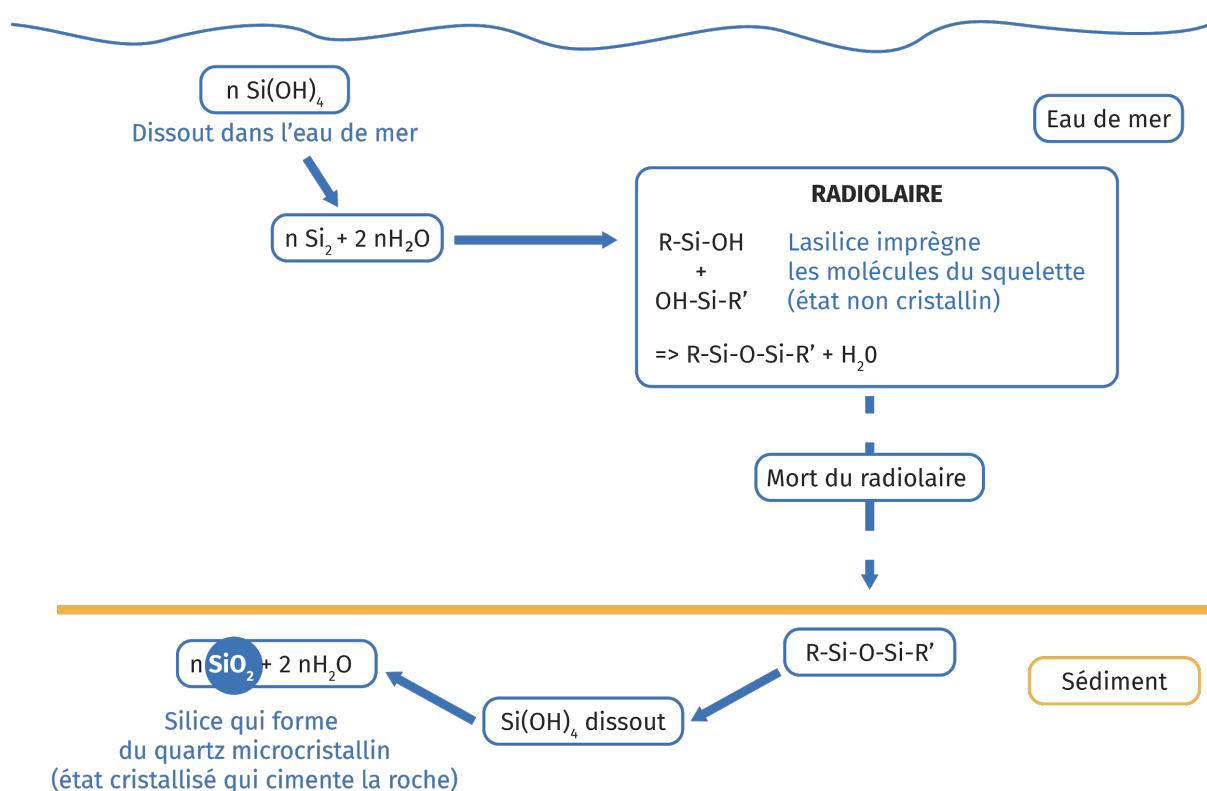
Donc $R = \frac{\sqrt{2}a}{4}$ soit $R = \frac{\sqrt{2}\sqrt[3]{\frac{N \times m_{Au}}{\rho}}}{4}$

$$R = \frac{\sqrt{2} \times \sqrt[3]{\frac{4 \times 3,27 \times 10^{-25}}{1,9 \times 10^4}}}{4} = 1,44 \times 10^{-10} \text{m}$$

Exercice 5 : Les radiolaires, architectes des temps modernes et producteurs de roches

Compétence principalement travaillée : Saisir des informations et les mettre en relation avec les connaissances (verre cristallisé ou amorphe).

Correction :

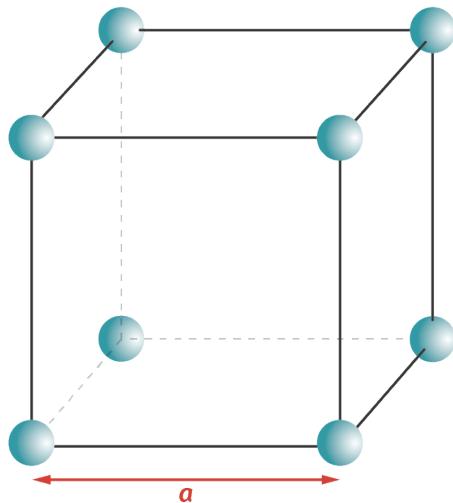


Exercice 6 : Le polonium, une maille peu courante

Compétence principalement travaillée : Représenter une maille en perspective cavalière.

Correction :

1.



Il y a un atome par sommet de la maille (donc 8). Un atome au sommet compte pour $\frac{1}{8}$ (il est partagé entre 8 mailles. Il y a

$$N = 8 \times \frac{1}{8} = 1$$

2. La masse volumique ρ se calcule selon la formule $\rho_{Po} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Po}}{a^3}$

$$m_{Au} = 3,47 \times 10^{-22} \text{ g} = 3,47 \times 10^{-25} \text{ kg}$$

$$\rho_{Po} = \frac{1 \times 3,47 \times 10^{-25}}{(0,340 \times 10^{-9})^3} = 8,22 \times 10^3 \text{ kg} = 8,8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

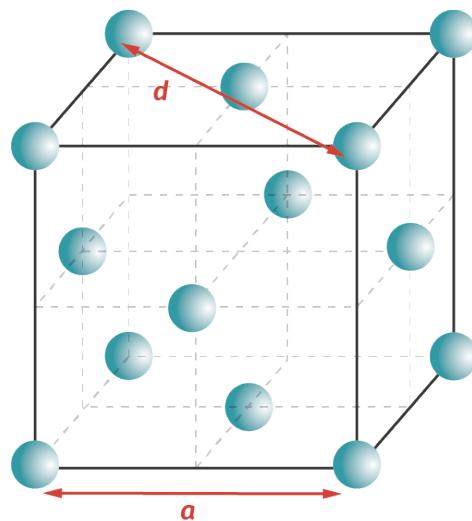
On retrouve le bon ordre de grandeur de la masse volumique pour le polonium, le modèle est donc bon.

Exercice 7 : « Gaz noble » à l'état solide !

Compétence principalement travaillée : Dénombrer les atomes et faire le lien avec la masse volumique.

Correction :

1.



$$\text{Dans une maille CFC } \sqrt{2}a = 4R \text{ soit } R = \frac{\sqrt{2}a}{4}$$

$$\text{Donc } R_{Ne} = \frac{\sqrt{2} \times 0,452}{4} = 0,160\text{nm}$$

$$R_{Ar} = \frac{\sqrt{2} \times 0,543}{4} = 0,191\text{nm}$$

$$R_{Kr} = \frac{\sqrt{2} \times 0,559}{4} = 0,198\text{nm}$$

$$R_{Xe} = \frac{\sqrt{2} \times 0,618}{4} = 0,218\text{nm}$$

2. La masse molaire est la masse d'une mole d'atomes. Il y a $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ atomes par mole. On peut donc calculer la masse d'un atome à partir de la masse molaire.

On trouve alors :

$$m_{Ne} = \frac{20,2}{6,022 \times 10^{23}} = 3,35 \times 10^{-23}\text{g}$$

$$m_{Ar} = \frac{39,9}{6,022 \times 10^{23}} = 6,63 \times 10^{-23}\text{g}$$

$$m_{Kr} = \frac{83,8}{6,022 \times 10^{23}} = 1,39 \times 10^{-22}\text{g}$$

$$m_{Xe} = \frac{131,3}{6,022 \times 10^{23}} = 2,18 \times 10^{-22}\text{g}$$



On a alors :

$$\rho_{Ne} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Ne}}{a^3}$$

$$\rho_{Ne} = \frac{4 \times 3,35 \times 10^{-23}}{0,452 \times 10^{-9}} = 1,45 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{Ar} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Ar}}{a^3}$$

$$\rho_{Ne} = \frac{4 \times 6,63 \times 10^{-23}}{0,543 \times 10^{-9}} = 1,66 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{Kr} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Kr}}{a^3}$$

$$\rho_{Kr} = \frac{4 \times 1,39 \times 10^{-22}}{0,559 \times 10^{-9}} = 3,18 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

$$\rho_{Xe} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{Xe}}{a^3}$$

$$\rho_{Xe} = \frac{4 \times 2,18 \times 10^{-22}}{0,618 \times 10^{-9}} = 3,69 \times 10^6 \text{ g/m}^3$$

Exercice 8 : Basalte et gabbro, les roches magmatiques de la croûte océanique

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la structure d'une roche et ses conditions de refroidissement.

Correction :

1. L'échantillon 1 est composé d'un ensemble de cristaux de grande taille et ne présente pas de zone de verre.

L'échantillon 2 est composé d'un mélange de verre, de microcristaux, et d'un cristal de grande taille.

2. Le basalte, composé principalement de microcristaux et de verre, a subi un refroidissement rapide. Cela se confirme par le fait que l'on constate que le basalte se trouve au niveau des zones de contact entre l'eau et le magma.

Le gabbro, lui, est entièrement cristallisé ce qui indique un refroidissement lent. Cela se confirme par le fait qu'il est situé sous le basalte, protégé de l'eau et a pu refroidir lentement lors du mouvement extensif.

6.3. Le coin des experts

Exercice 9 : Le carboglace

Compétence principalement travaillée : Déterminer les paramètres géométriques d'une maille.

ERRATUM : La masse d'une molécule de CO₂ n'est pas m = 7,31 × 10⁻²³ kg mais m = 7,31 × 10⁻²⁶ kg.

**Correction :**

1. La carboglace cristallise dans une structure CFC. Dans cette structure, il y a 4 molécules par maille.

La densité de la carboglace est $d = 1,56$, sa masse volumique est donc

$$\rho_{\text{carboglace}} = \rho_{\text{eau}} \times d = 1,56 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Or a masse volumique $\rho_{\text{carboglace}}$ se calcule selon la formule $\rho_{\text{carboglace}} = \frac{m}{V} = \frac{N \times m_{CO_2}}{a^3}$

$$\text{Soit } a^3 = \frac{N \times m_{CO_2}}{\rho} \quad \text{. Donc } a = \sqrt[3]{\frac{N \times m_{CO_2}}{\rho}}$$

$$\text{Donc } a = \sqrt[3]{\frac{4 \times 7,31 \times 10^{-26}}{1,56 \times 10^3}} = 5,72 \times 10^{-10} \text{ m} = 572 \text{ pm}$$

2. On suppose que la tangence dans cette maille CFC se fait selon la diagonale d'une face. On appelle R la distance entre deux molécules. On a donc la relation mathématique : $\sqrt{2}a = 4R$ soit

$$R = \frac{\sqrt{2}a}{4}$$

$$\text{Donc } R = \frac{\sqrt{2} \times 5,72 \times 10^{-10}}{4} = 202 \text{ pm}$$

Cette valeur est inférieure à 2 fois la longueur de la liaison C=O. On en déduit que les molécules ne sont pas alignées le long des diagonales des faces de la maille.

Exercice 10 : Fer α et acier

Compétence principalement travaillée : Déterminer les paramètres géométriques d'une maille.

$$a = \frac{4r_1}{\sqrt{2}} \quad a = \frac{4r_1}{\sqrt{3}}$$

ERRATUM : Le paramètre de maille dans cette situation vaut

Note : La maille cubique centrée n'est pas au programme, mais l'exercice peut servir d'entraînement pour des élèves ayant bien maîtrisé les mailles CS et CFC.

Correction :

1. Dans la maille cubique centrée (CC), il y a un atome à chaque sommet de la maille ainsi qu'un atome au centre. Le nombre d'atomes de fer est donc

$$N = 8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

Les sites octaédriques, dans lesquelles les atomes de carbone pourraient s'insérer, sont situés au milieu des arêtes ou au milieu des faces.

Un atome situé sur une arête compte pour $\frac{1}{4}$ et un atome situé sur une face compte pour $\frac{1}{2}$. Il y a 12 et 6 faces dans un cube. Si tous les sites octaédriques sont occupés par des atomes de carbone, il y a

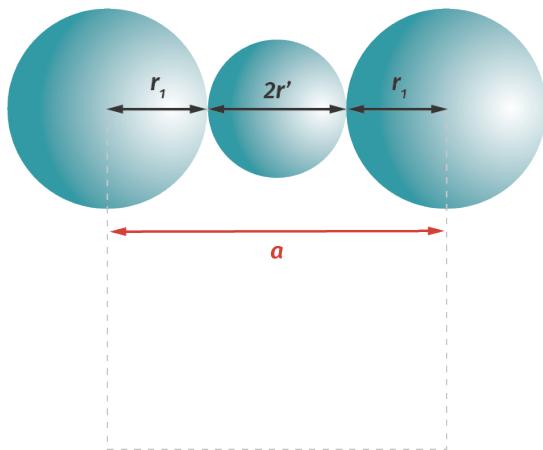
$$\text{donc } N_C = 12 \times \frac{1}{4} + 6 \times \frac{1}{2} = 6 \text{ atomes de carbone.}$$

Le nombre d'atomes de fer et d'atomes de carbone dans la maille serait donc : 2 atomes de fer pour 6 atomes de carbone. Soit une proportion de 3 atomes de carbone pour un atome de fer. La formule du



composé serait donc FeC_3 .

2. S'il y a tangence le long d'une arrête, la maille est dans la situation suivante :



La relation mathématique pouvant être établie est alors : $a = 2r_1 + 2r'$ or $a = \frac{4r_1}{\sqrt{2}}$ donc
 $2r' = \frac{4r_1}{\sqrt{2}} - 2r_1 = \frac{(4 - 2\sqrt{2})r_1}{\sqrt{2}}$ soit finalement $r' = \frac{(4 - 2\sqrt{3})r_1}{2\sqrt{2}}$.

3. En réalisant l'application numérique, on trouve $r' = 0,414r_1$ soit $r' = r_1$ pm. Les sites octaédriques sont plus petits que les atomes de carbone. On en déduit que soit l'insertion des atomes de carbone n'est pas possible et ne s'effectue pas, ou bien qu'elle s'effectue en déformant la maille. Auquel cas, les sites risquent de ne pas être tous occupés.

Exercice 11 : La synthèse artificielle des pierres précieuses : une aventure à haute température

Compétence principalement travaillée :

- Distinguer maille, cristal, minéral et roche ;
- Mettre en relation des données pour expliquer un procédé de fabrication ;
- Savoir exploiter un diagramme Pression / Température ;
- Communiquer.

Correction :

On apprend que saphir et rubis sont deux minéraux formés lors d'épisodes métamorphiques, de formule chimique Al_2O_3 (alumine anhydre) dont la couleur ne diffère que par des inclusions d'éléments (doc 1 et 2). Leur formule chimique identique n'empêche cependant une cristallisation dans un seul et même système cristallin (rhomboédrique).

Les conditions de leur formation impliquent des températures et des pression élevées (docs 1 et 3) : domaine de l'éclogite et de la granulite (plus de 1 GPa et de 700°C pour le saphir et 5 kBar pour 650 à 750°C dans le cas du rubis).



Ces connaissances sont employées dans leur synthèse artificielle.

Ainsi, suivant le procédé Verneuil (encadré en bas), les gemmes synthétiques sont obtenues par fusion d'alumine dans un four à plus de 2500°C par superposition de couches fines suivant un dispositif de goutte à goutte et en y ajoutant des oxydes métalliques.

On peut supposer que le four maintient les gemmes de synthèse en formation dans des conditions de pression se rapprochant de celles décrites pour les gemmes naturelles.

Exercice numérique supplémentaire :

BIENTÔT DISPONIBLE.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 3 - Une structure complexe : la cellule

Introduction

Présentation

Le chapitre s'articule en trois parties :

- Découverte de la théorie cellulaire et ses 3 axiomes (histoire des sciences)
- Présentation de techniques de microscopies et leur contribution dans la compréhension de l'unité mais aussi de la diversité cellulaire
- Emphase sur la cellule comme unité structurale délimitée par une membrane plasmique permettant de séparer un milieu interne tout en autorisant des échanges.

L'objectif principal de ce chapitre est de montrer comment s'est construite la théorie cellulaire petit à petit avec les controverses associées, ainsi que l'importance du développement technique (ici la microscopie) en sciences de la vie.

L'élève, déjà familier avec la notion de cellule, pourra découvrir comment la science se construit par l'observation (la microscopie), l'expérimentation (l'expérience des bœufs de Pasteur) ou la mesure (la biochimie des membranes). La théorie cellulaire a connu de nombreuses critiques que les élèves pourront étudier en se remettant dans le contexte du XVII et XVIII^e siècle.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

- En Seconde : La cellule spécialisée (ultrastructure et expression génétique)
- Au cycle 4 : La cellule eucaryote est constituée d'un noyau, d'un cytoplasme et d'une membrane. L'information héréditaire est située dans le noyau.

Bibliographie

- *La cellule : Comprendre la composante de la vie*, Jack Challoner, Courrier Du Livre, 2017.
- *Histoire de la biologie et de la médecine*, J.C. Baudet, De Boeck, 2018.
- *Biochimie*, Voet & Voet, De Boeck, 2015.
- *Biologie Moléculaire de la Cellule*, Alberts, Médecine Sciences Publications, 2011.
- *Pourquoi refuser la théorie cellulaire ? Le projet d'une anatomie chimique chez Charles Robin (1821-1885)*, Laurent Loison, Revue d'histoire des sciences, Tome 68, p. 23-45, 2015.





- *De la théorie cellulaire à la théorie neuronale*, Andrée Tixier-Vidal, Biologie Aujourd’hui, Société de Biologie, 2011.

Sitographie

- Un documentaire en 3 parties (en anglais) réalisées par la BBC sur la découverte et la construction de notion de cellule :
 - The Cell - 01 *The Hidden Kingdom* : <https://www.dailymotion.com/video/x11pe80> ;
 - The Cell - 02 *The Chemistry Of Life* : <https://www.dailymotion.com/video/x2a1crf> ;
 - The Cell - 03 *The Spark of Life* : <https://www.dailymotion.com/video/x11t0lg>.
- Le Human Cell Atlas : <https://www.humancellatlas.org/> : une plateforme qui a pour projet de recenser les différentes cellules (types cellulaires, nombre, localisation, interactions intercellulaires, etc.).

Activité 1 : De l’invention du microscope à la théorie cellulaire (activité de groupe)

1.1. Généralités

L’objectif de l’activité est que les élèves se familiarisent avec la théorie cellulaire. Le travail s’effectue par axiome, en groupe (un groupe, un axiome). Les élèves auront l’occasion d’étudier des documents historiques sur les contributeurs à cette théorie ainsi que de leurs opposants, et d’appréhender la méthode scientifique à travers l’observation et l’expérience.

L’étude de la cellule comme unité du vivant est également un fondement de la biologie en tant que science, comme le soulève la citation de François Jacob proposée en entrée de chapitre.

Objectifs notionnels :

- L’observation de structures semblables dans de très nombreux organismes a conduit à énoncer le concept général de cellule et à construire la théorie cellulaire.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser et interpréter des documents historiques relatifs à la théorie cellulaire.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Développer un esprit critique (à travers les controverses dans la construction de la théorie cellulaire) ;
- Comprendre la méthode scientifique (à travers les expériences de Pasteur).

Durée : 20 minutes pour la découverte des documents en groupe ; 30 minutes pour une restitution en classe complète





1.2. Présentation des documents

Document d'appel : Les élèves sont déjà familiers avec le concept de cellules comme composant des êtres vivants et de cellules spécialisées. Il est donc possible d'utiliser comme situation d'appel un ensemble de photos d'êtres vivants (un champignon, un métazoaire pluricellulaire, un microorganisme, etc) et de demander ce qui entre dans leur composition. Les réponses permettront au professeur de faire un diagnostic de la représentation que les élèves ont des échelles du vivant entre l'atome et la cellule.

1.2.1. Ensemble documentaire Groupe 1

Présentation des documents : Les premières observations de cellules

- **Document 1 :** Présentation des premières observations de cellules par Hooke, réalisées à l'aide de l'invention d'un microscope.
- **Document 2 :** Apports de Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) qui conçut un microscope simple (cf ressources complémentaires) lui permettant de nombreuses observations de cellules.

Suggestions de questions :

- Pourquoi l'observation des premières cellules n'a pas été possible sans une avancée des outils d'observation ?
- Que suggèrent les structures mises en évidence par Leeuwenhoek ?
- Hooke et Leeuwenhoek étaient-ils des scientifiques ?

Ressources complémentaires :

- Le microscope de Antoni Van Leeuwenhoek peut être présenté aux élèves :
<http://www.museedesconfluences.fr/fr/ressources/microscope-simple-de-leeuwenhoek-r%C3%A9alise>
Il s'agit d'un simple système de loupes qui fonctionnait comme pour une visée ; l'objet à observer était placé devant l'œil. Les élèves pourront apprécier la simplicité de cet outil mais également la complexité imaginée par ce fabricant de lentilles.

1.2.2. Ensemble documentaire Groupe 2

Présentation des documents : L'unité microscopique des êtres vivants

- **Document 3 :** Témoignage de Schwann, zoologiste, à propos de sa rencontre avec Schleiden, botaniste, et de leur intuition que toutes les structures vivantes observées sont composées de cellules.
- **Document 4 :** Illustration du témoignage de Schwann du document 3. Toutes les structures observées présentent des cellules nucléées.





- **Document 5** : Présentation d'une vision évolutionniste de la composition cellulaire des êtres vivants comme héritée d'un ancêtre commun : LUCA.

Suggestions de questions :

- Comment l'idée de la cellule comme composant élémentaire de tout être vivant est-elle née chez Schwann ?
- Pourquoi la cellule comme caractère commun à tous les êtres vivants est un argument de l'origine unique de tous les êtres vivants ?

Ressources complémentaires :

- <https://www.youtube.com/watch?v=zNFn4t6iT9o> : C'est pas sorcier Théorie de l'évolution : de Darwin à la génétique, permettant de remplacer les concepts d'ancêtre commun et ses descendants, innovations évolutives et caractères hérités (ici la présence de cellule).

1.2.3. Ensemble documentaire Groupe 3

Présentation des documents : La formation de nouvelles cellules

- **Document 6** : La génération spontanée défendue par Aristote avec une vision créationniste.
- **Document 7** : L'expérience de Pasteur qui réfute (avec celle de Rudi) la théorie de la génération spontanée en démontrant que les microorganismes ne se forment qu'à partir d'autres microorganismes (contamination) mais que l'apparition « spontanée » n'est pas possible en milieu stérile.
- **Document 8** : Témoignage d'un chercheur en biologie du développement qui illustre que dans un organisme pluricellulaire, toutes les cellules sont issues de divisions successives d'une seule cellule-œuf.
- **Document 9** : Observation de l'émergence d'une nouvelle cellule à partir d'une cellule pré-existante par division cellulaire chez la levure *Saccharomyces pombe*.

Suggestions de questions :

- Qu'est ce que la génération spontanée défendue par Aristote ?
- Pourquoi l'expérience de Pasteur réfute-t-elle la théorie de la génération spontanée ?
- D'après la théorie cellulaire, comment se forme une nouvelle cellule ?

1.3. Les indicateurs de réussite

Groupe 1 :

- 1. Les élèves devront mettre en avant la nécessité technique d'avoir un outillage sophistiqué permettant d'observer les cellules, des structures microscopiques non observables à l'œil nu.





- **2.** Hooke et Leeuwenhoek n'étaient pas « biologistes » ni même « scientifiques ». Ils étaient artisans et ont chacun construit leur propre matériel d'observation alors qu'un biologiste moderne serait incapable de construire un microscope ou le matériel utilisé en laboratoire. D'autre part, ils travaillaient sur un nombre d'objets très variés, allant de la pointe d'une aiguille, du liège, de l'eau, de sperme, etc. Leur apport à la théorie cellulaire est donc à la fois de l'ordre de l'outillage, de l'observation et du dessin.
- **3.** François Jacob sous-entend que pour les biologistes, les scientifiques étudiant la vie, la plus petite unité du matériel d'observation (les êtres vivants) est la cellule.

Groupe 2 :

- **1.** Schwann a voulu démontrer que les êtres vivants, qu'ils soient animaux ou végétaux, sont formés de cellules.
- **2.** Les cellules étudiées possèdent toutes un noyau et une membrane plasmique.
- **3.** D'après la vision évolutionniste défendue depuis Darwin, si tous les êtres vivants présentent un caractère commun (ici la composition cellulaire), ce caractère provient d'un ancêtre commun (ici LUCA) qui présentait ce caractère et tous ses descendants en ont ainsi hérité. L'unité cellulaire des êtres vivants est donc un argument sur l'origine commune de tous les êtres vivants.

Il pourra être noté qu'un ancêtre commun n'est pas forcément l'organisme chez qui l'innovation évolutive est apparue. Il s'agit d'une erreur de représentation fréquente en évolution. On voit sur le document 5 que LUCA n'est pas l'organisme chez qui la première cellule s'est formée : la première cellule peut être antérieure à LUCA, mais ces formes de vie n'ont plus de lignées représentées actuellement. LUCA est donc « que » le dernier ancêtre commun constitué de cellules de qui dérivent toutes les formes de vie actuelle.

Groupe 3 :

- **1.** La théorie admise au XVIII^e siècle était la théorie de la génération spontanée : des organismes peuvent apparaître de novo, sans préexistence d'un autre organisme.
- **2.** Le doc. 2 prouve que toutes les cellules naissent d'une cellule préexistante, il permet de déduire que de nouveaux micro-organismes peuvent coloniser le milieu après ébullition si et seulement si une entrée de micro-organismes est possible. Ceci réfute la théorie de la génération spontanée. Le mécanisme est explicité doc 3 : existence de divisions cellulaires.
- **3.** L'importance de cette découverte en recherche biologique : la compréhension du fait que toute cellule naît d'une cellule préexistante (un des axiomes de la théorie cellulaire) permet d'appréhender les mécanismes de développement d'un organisme pluricellulaire et ainsi d'en comprendre des anomalies. On peut aussi utiliser ces connaissances pour contrôler artificiellement (en culture contrôlée) des cellules, à des fins de recherche fondamentale ou appliquée (buts thérapeutiques).





Activité 2 : Une nouvelle description de la cellule (documentaire)

2.1. Généralités

À travers cette activité, les élèves apprêhenderont l'apport de connaissances qui a été permis par la résolution apportée par la microscopie électronique. À travers 3 types de microscopie différentes, les élèves pourront comparer les avantages et inconvénients des techniques ainsi que leur domaine d'utilisation. Finalement, la résolution apportée par la microscopie permettra aux élèves de comparer l'ultrastructure de cellules pour en dégager des points communs (unité cellulaire du vivant) et des différences (spécialisation cellulaire).

Objectifs notionnels :

- La découverte de l'unité cellulaire est liée à l'invention du microscope ;
- Plus récemment, l'invention du microscope électronique a permis l'exploration de l'intérieur de la cellule et la compréhension du lien entre échelle moléculaire et cellulaire.

Objectifs méthodologiques :

- Situer les ordres de grandeur : atome, molécule, organite, cellule, organisme.

Durée : 20 minutes.

2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Tableau regroupant quelques caractéristiques de la microscopie optique, électronique à transmission et à balayage, ainsi que des exemples de clichés d'un grain de pollen.
- **Document 2** : Comparaison de l'ultrastructure cellulaire d'un pneumocyte (une cellule animale de poumon) et d'une cellule végétale de maïs. Les annotations communes permettent de comparer les deux cellules.

2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La microscopie optique a l'avantage d'être une méthode rapide et facilement réalisable ; il s'agit des microscopes que les élèves manipulent au collège et au lycée. Elle permet d'observer des échantillons vivants et en couleur.

La microscopie électronique à transmission permet d'obtenir des résolutions très élevées, donc d'observer des structures dans la cellule que la microscopie optique ne permet pas de visualiser (ex : noyau ou mitochondrie).

La microscopie électronique à balayage permet d'observer des échantillons en trois dimensions.



Question 2 : L'observation d'une cellule végétale de maïs et d'un pneumocyte (une cellule animale) permet de dégager :

- Des structures en commun : on observe des cellules constituées d'une membrane plasmique, du cytoplasme, de mitochondries. Ces points communs mettent en avant l'unicité cellulaire.
- Des différences : on observe des vésicules uniquement chez le pneumocyte, et une paroi et des vacuoles uniquement chez la cellule de maïs. Ces différences mettent en évidence que les cellules ont des structures propres à leur type cellulaire ; c'est la spécialisation cellulaire qui illustre la diversité des cellules.

Activité 3 : L'organisation structurale des cellules (documentaire)

3.1. Généralités

Cette activité permet de découvrir la composition des membranes plasmiques. Cette interface entre le milieu intracellulaire et le milieu extracellulaire délimite une cellule, et les élèves mettront ici en lien le rôle de la membrane (perméabilité sélective) avec sa structure et ses propriétés biochimiques.

Objectifs notionnels :

- La cellule est un espace séparé du milieu extérieur par une membrane plasmique ;
- Cette membrane est constituée d'une bicouche lipidique et de protéines ;
- La structure membranaire est stabilisée par le caractère hydrophile ou lipophile de certaines parties de ses molécules constitutives.

Objectifs méthodologiques :

- Relier l'échelle de la cellule et celle de la molécule (exemple de la membrane plasmique) ;
- Schématiser la membrane plasmique à partir de molécules dont les parties hydrophile / lipophile sont identifiées.

Durée : 30 minutes

3.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Détail d'une membrane plasmique observée au MET. Une observation fine permet d'observer deux traits (les têtes polaires des lipides membranaires formant une bicouche).
- **Document 2** : Illustration de la diversité biochimique avec la composition de quelques membranes plasmiques et membranes d'organites.
- **Document 3** : Visualisation et composition détaillée de 2 composants principaux des membranes : la phosphatidyl-choline et le cholestérol. La nature hydrophile et lipophile de certains groupements est indiquée.





- **Document 4** : Schématisation de l'organisation des lipides membranaires en fonction de leurs parties hydrophobes et lipophiles. La schéma (a) permet de faire le lien entre la nature chimique (hydrophile ou lipophile) d'un lipide et son comportement face à l'eau et à l'air. Le schéma (b) illustre l'auto-organisation en bicouche des lipides de part leur nature amphiphile. Cette bicouche peut s'observer sur le document 1.
- **Document 5** : Présentation de l'aquaporine, un exemple de protéine membranaire impliquée dans les échanges contrôlés entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule (diffusion facilitée d'eau).
- **Document 6** : Schématisation du modèle de la mosaïque fluide illustrant l'organisation en bicouche lipidique, mais également la présence d'autres groupes biochimiques (glucides et protéines).

3.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Sur le document 3, on observe que les lipides membranaires présentent à la fois des groupement hydrophiles (les têtes polaires) et lipophiles (les queues apolaires). Ces molécules sont donc amphiphiles. Dans une interface eau-air, les têtes se dirigeront donc spontanément au contact de l'eau, et les queues au contact de l'air, comme cela est illustré sur le document 4a. En milieu aqueux, les queues lipophiles vont se regrouper pour « fuir » le contact avec l'eau, et les lipides membranaires s'auto-organiseront spontanément en bicouche, comme cela est illustré sur le document 4b. Ces propriétés chimiques très particulières expliquent l'organisation en bicouche lipidique des membranes.

Question 2 : Au microscope électronique, il est possible d'observer deux lignes noires séparées par une ligne plus claire au niveau de la membrane plasmique. Cette observation peut être interprétée comme la structure en bicouche lipidique, avec des têtes polaires denses aux électrons au niveau des lignes noires, et des queues apolaires moins denses au niveau des lignes plus claires.

Question 3 : De part sa nature biochimique particulière, l'intérieur de la membrane est constitué des queues apolaires lipophiles. Cette propriété rend le passage de molécule d'eau à travers la membrane très peu favorable. Les aquaporines sont des canaux protéiques permettant le passage d'eau à travers la membrane sans être en contact avec ses queues lipophiles. En l'absence de telle structure, le passage efficace d'eau à travers une couche lipophile ne serait pas envisageable.

Question 4 : La membrane plasmique est constituée de lipides présentant une propriété chimique particulière : ils sont amphiphiles. Leurs queues lipophiles se regroupent et leurs têtes hydrophiles sont en contact avec le milieu extracellulaire d'un côté, et du cytoplasme d'autre part. Cette propriété chimique explique l'organisation spontanée en bicouche qui sépare deux milieux distincts. Dans cette bicouche sont encastrées des protéines, comme des canaux permettant le passage de molécules à travers la membrane, et des glucides.



Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : La controverse entre Pouchet et Pasteur

Compétence principalement travaillée : Analyser et interpréter des documents historiques relatifs à la théorie cellulaire ; exercer son esprit critique ; comprendre la notion de témoins en sciences expérimentales.

Correction :

1. On observe sur le document 2 que les bactéries étudiées présentent un taux de survie supérieur à 0 UA à 100 °C. Or, il s'agit de la température à laquelle est portée l'eau de foin dans l'expérience de Pouchet. Cette température n'est donc pas suffisante pour stériliser le milieu et éliminer les bactéries présentes dans le foin. Ces bactéries sont résistantes à l'ébullition et l'observation au microscope (document 1) met en évidence la présence d'enveloppes de protection très épaisses dans les spores de bactéries. Il n'est donc pas possible de conclure que les bactéries de foin se sont formées spontanément avec cette expérience.
2. Pouchet aurait pu réaliser une expérience supplémentaire : un flacon également fermé hermétiquement, mais avec de l'eau. Cette eau portée à ébullition. Il s'agit d'un témoin négatif (comme c'est le cas dans l'expérience des becs de cygne de Pasteur doc 7 p.46) qui devient une règle d'or en sciences expérimentales avec la méthodologie proposée par Pasteur.
3. Pouchet défendait une idéologie, celle de la génération spontanée, qui était soutenue et admise par la communauté scientifique de l'époque. Il ne s'est donc pas donné les moyens de vérifier son hypothèse avec une méthodologie scientifique rigoureuse.

Sources :

- *Muramic lactam in peptidoglycan of Bacillus subtilis spores is required for spore outgrowth but not for spore dehydration or heat resistance*, Popham DL, Helin J, Costello CE, Setlow P., Proc Natl Acad Sci U S A, 1996 : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC26417/>
- La controverse Pouchet - Pasteur, à propos de la génération spontanée, consacre l'importance du témoin négatif dans l'expérimentation :
http://www.svt.ac-aix-marseille.fr/ancien_site/outils/experimentation/p2.htm
- *Pasteur et Pouchet : hétérognèse de l'histoire des sciences*, Latour B. :
<http://www.bruno-latour.fr/sites/default/files/38-POUCHET-FR.pdf>





Exercice 2 : Ordres de grandeur d'observation d'un organisme

Compétence principalement travaillée : Situer des ordres de grandeur de taille.

Correction (réponses aux questions 1 et 2 par photographie) :

Photographie 1 : MET - molécule - 2 nm.

Photographie 2 : appareil photo standard - organisme - 15 cm.

Photographie 3 : MET - cellule - 10 µm.

Photographie 4 : MEB - tissu (pour l'artériole) / cellules (cellules sanguines) - 110 µm / 10 µm.

Photographie 5 : MEB - molécule - 1 µm.

4.2. Le repaire des initiés

Exercice 3 : Les virus sont-ils vivants ?

Compétence principalement travaillée : Confronter des informations nouvelles à ses connaissances.

Correction :

1. Une cellule est délimitée par une membrane plasmique, constituée majoritairement de lipides organisés en bicouche, ainsi que de protéines et de glucides.
2. On observe que les bactériophages n'ont pas de membrane plasmique mais une capsidé constituée de protéines.
3. La théorie cellulaire stipule que tous les êtres vivants sont constitués d'une ou plusieurs cellules. Ce n'est pas le cas du bactériophage étudié ici.
4. Les virus n'étant pas constitués de cellules, ils ne peuvent donc pas être considérés comme vivants. De plus, le document 2 indique que les virus se reproduisent en injectant leur ADN dans la cellule et en la parasitant ; ils ne sont donc pas autonomes.

Exercice 4 : Les domaines transmembranaires d'une protéine

Compétence principalement travaillée : Confronter de nouvelles données à ses connaissances.

Correction :

1. La propriété amphiphile des lipides, c'est-à-dire la présence de groupement hydrophile et de groupement lipophile au sein de la même molécule, permet aux lipides de se regrouper par les queues lipophiles qui s'auto-organisent en bicouche lipidique.
2. L'intérieur de la bicouche lipidique est constitué des parties lipophiles des lipides (les queues) ; il est donc fortement lipophile. Les protéines transmembranaires peuvent s'insérer dans la bicouche lipidique si la partie qui traverse la membrane présente également des propriétés lipophiles.



La méthode employée ici vise à évaluer le comportement hydrophobe le long d'une protéine. Il est donc cohérent que la partie la moins hydrophobe sera la partie encastrée dans la bicouche lipidique. Cette méthode permet donc de prédire de manière pertinente les parties d'une protéine qui sont susceptibles d'être transmembranaires, et à l'inverse les parties qui ne le seront probablement pas.

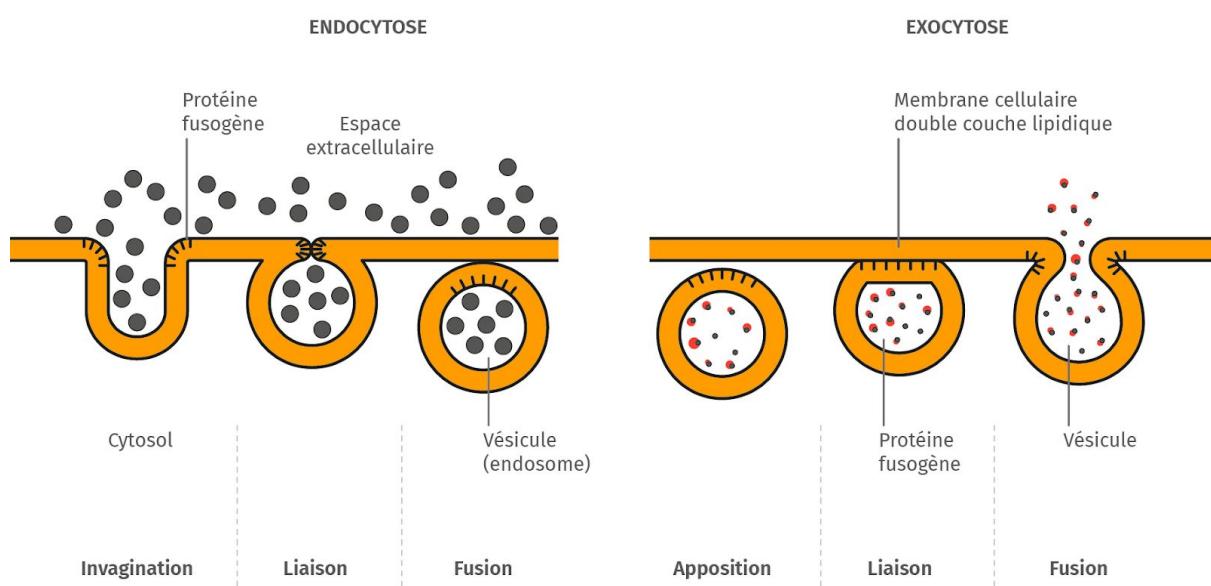
Exercice 5 : Neurones et fusion membranaire

Compétence principalement travaillée : Pratiquer une démarche scientifique.

Correction :

1. Les échelles d'observation nous indiquent une technique de microscopie à résolution très élevée ; il s'agit donc de microscopie électronique. Le cliché 1 présente des structures en relief ; il s'agit donc de microscopie électronique à balayage. Les clichés 2 sont des coupes en deux dimensions ; il s'agit donc de microscopie électronique à transmission.

2.



3. Les structures observées ont un aspect en « cuvette ». Il s'agit de vésicules qui ont fusionné avec la membrane plasmique qui confèrent une dépression dans la membrane plasmique.

4.3. Le coin des experts

Exercice 6 : La fluidité de la membrane plasmique

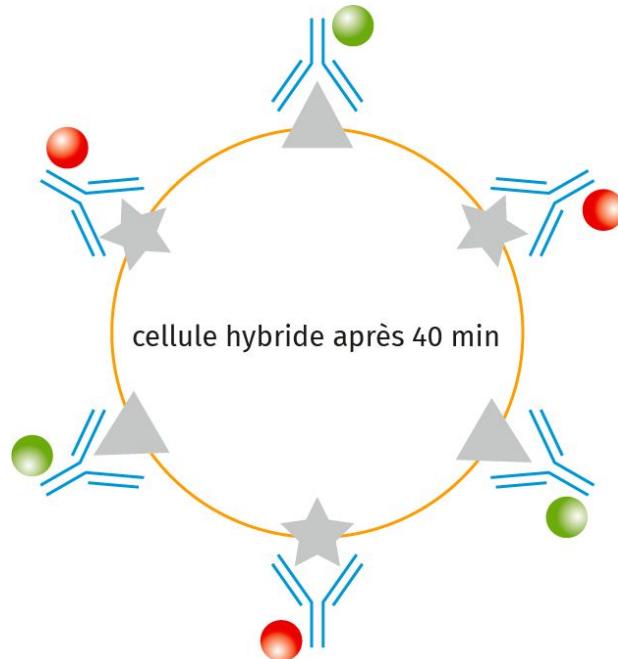
Compétence principalement travaillée : Tester une hypothèse par des données expérimentales.

Correction :



1. L'anticorps se trouve dans le milieu extracellulaire. Afin qu'il puisse être en contact et se fixer sur une protéine membranaire, cette protéine doit présenter une zone extracellulaire. Si la protéine ne contient qu'une zone intracellulaire, ou une zone intra-membranaire, l'anticorps n'aura pas de zone avec laquelle il pourra interagir et l'expérience ne pourra pas fonctionner. L'expérimentateur doit donc choisir une protéine qui répond à ce critère.

2.



3. On observe que la fluorescence est répartie de manière homogène tout autour de la cellule après 40 minutes. Or cette fluorescence est un marqueur témoignant de la position de protéines transmembranaires. Donc ces protéines transmembranaires se sont homogénéisées tout autour de la cellule hybride.

La membrane est donc une structure fluide dans laquelle les protéines se déplacent. L'hypothèse d'une membrane figée est donc rejetée.

Source : *The rapid intermixing of cell surface antigens after formation of mouse-human heterokaryons*, Frye et Eddin, 1970.



Exercice 7 : L'origine endosymbiotique des mitochondries

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation des données et des connaissances.

Correction :

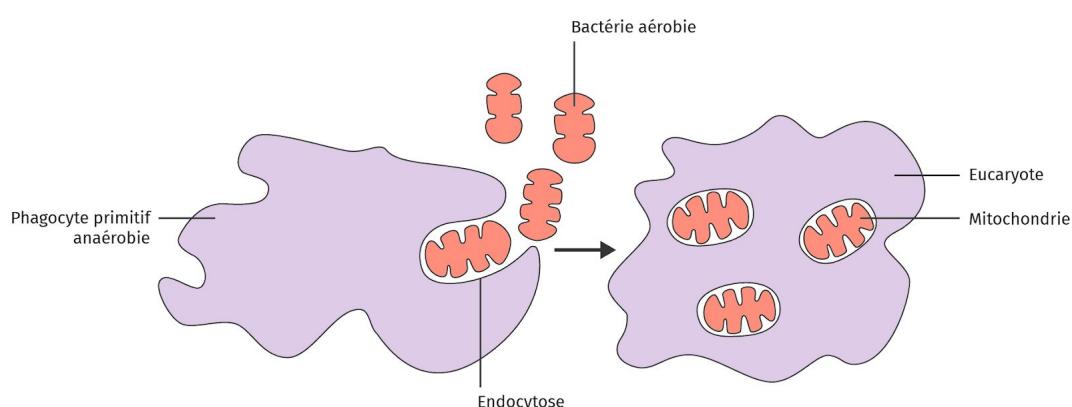
Les mitochondries, présentes dans les cellules eucaryotes, présentent des caractéristiques très proches des bactéries :

- ADN mitochondrial proche de l'ADN bactérien
- Taille semblable de l'ordre de grandeur du micromètre (1,3 µm pour la mitochondrie / 2,2 µm pour la bactérie)

Ces deux arguments suggèrent que la mitochondrie aurait une origine bactérienne.

- Composition biochimique de la membrane interne des mitochondries est proche de celle des bactéries, alors que celle de la membrane externe est proche d'une membrane plasmique de cellule eucaryote.

Cet argument suggère que la mitochondrie proviendrait d'une bactérie qui aurait été endocytée. La membrane interne de la mitochondrie tiendrait son origine de la membrane bactérienne endocytée, alors que la membrane externe tiendrait son origine de la membrane plasmique cellulaire qui aurait formé une vésicule autour de la bactérie lors du processus d'endocytose.



Endosymbiose mitochondrie d'après Boitard, modifié et simplifié.

Références complémentaires :

- *Symbiose et évolution : à l'origine de la cellule eucaryote*, Marc-André Sélosse : <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/symbiose-evolution-lorigine-de-cellule-eucaryote/>
- Le site de Jussieu (sur le chloroplaste, mais il s'agit du même principe pour la mitochondrie) : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/endosymbiose.htm>

Exercice numérique supplémentaire :

BIENTÔT DISPONIBLE.

Document sous licence libre Creative Commons





Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 4 : Le rayonnement solaire

Introduction

Présentation

La Terre reçoit essentiellement son énergie du Soleil. Il la lui transmet par rayonnement. Cette énergie conditionne la température de surface de la Terre et détermine climats et saisons. Elle permet la photosynthèse des végétaux et se transmet par la nutrition à d'autres êtres vivants.

Ce chapitre introduit le thème 2 du programme « Le Soleil, notre source d'énergie ». Il abordera l'émission d'énergie du Soleil par rayonnement puis le type spectral de notre étoile par la détermination de sa température de surface qui est liée à sa couleur. Cette énergie diffusée dans toutes les directions, une partie arrive alors sur Terre et nous verrons que la répartition de l'énergie sur Terre est inégale suivant l'heure de journée, la latitude et le moment de l'année.

Ce chapitre aura aussi pour objectif de déconstruire l'idée fausse qu'il fait plus froid au pôle qu'à l'équateur parce que l'équateur est plus proche du Soleil que les pôles. Cet écart de distance est infime devant les 150 millions de km qui nous séparent de notre étoile. À noter, de plus que lorsque la Terre est au plus proche du Soleil (aux alentours du 4 janvier), nous sommes en hiver dans l'hémisphère nord.

Ce chapitre peut faire le lien avec le thème 3 : « La Terre un astre singulier ».

Ce qui est enseigné aux cycles 3 et 4

Programme de Cycle 3 : (Sciences et Technologie) :

- Décrire les mouvements de la Terre (rotation sur elle-même et alternance jour-nuit, autour du Soleil et cycle des saisons) ;
- Les mouvements de la Terre sur elle-même et autour du Soleil.

Programme de Cycle 4 : (Physique-Chimie) :

- Constituants de l'atome, structure interne d'un noyau atomique (nucléons : protons, neutrons), électrons ;
- Identifier les différentes formes d'énergie : Cinétique (relation $E_c = \frac{1}{2}mv^2$), potentielle (dépendant de la position), thermique, électrique, chimique, nucléaire, lumineuse ;
- Identifier les sources, les transferts et les conversions d'énergie ;
- Etablir un bilan énergétique pour un système simple :
 - Sources ;
 - Transferts ;
 - Conversion d'un type d'énergie en un autre ;
 - Conservation de l'énergie.
- Utiliser la relation reliant puissance et énergie ;
- Notion de puissance relation $\Delta E = P \cdot \Delta t$.



Programme de 2nde : (Physique-Chimie) :

- Notions et contenus :
 - Numéro atomique, nombre de masse, écriture conventionnelle : $_{Z}^{A}X$ ou ${}^A_Z X$;
 - Élément chimique ;
 - Masse et charge électrique d'un électron, d'un proton et d'un neutron, charge électrique élémentaire, neutralité de l'atome ;
 - Isotopes ;
 - Écriture symbolique d'une réaction nucléaire ;
 - Aspects énergétiques des transformations nucléaires : Soleil, centrales nucléaires ;
 - Vitesse de propagation de la lumière dans le vide ou dans l'air ;
 - Lumière blanche, lumière colorée. Spectres d'émission : spectres continus d'origine thermique, spectres de raies.
- Compétences exigibles :
 - Établir l'écriture conventionnelle d'un noyau à partir de sa composition (et inversement) ;
 - Identifier des isotopes ;
 - Relier l'énergie, convertie dans le Soleil et dans une centrale nucléaire, à des réactions nucléaires ;
 - Identifier la nature physique, chimique ou nucléaire d'une transformation à partir de sa description ou d'une écriture symbolique modélisant la transformation ;
 - Citer la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées ;
 - Caractériser le spectre du rayonnement émis par un corps chaud.

Sitographie

- Livret du CEA sur le Soleil : <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/le-soleil.aspx>
- Site de la NASA sur le SDO : <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>
- C'est pas Sorcier, *Le Soleil* : https://www.youtube.com/watch?v=F2zOHTQq_U
- Article du Monde : https://www.lemonde.fr/cosmos/video/2015/11/02/la-nasa-montre-le-soleil-en-ultra-haute-definition_4801648_1650695.html
- La série documentaire, *L'empire du Système solaire* (surtout épisode 1) : <http://www.inexplique-en-debat.com/article-l-empire-du-systeme-solaire-la-serie-des-5-documentaires-sur-l-astronomie-91310485.html>
- Vidéo MOOC ExplorUnivers : <https://webtv.univ-nantes.fr/fiche/6451/mooc-explorunivers-3-le-soleil-et-les-etoiles-le-soleil-une-source-de- chaleur-infinie>
- Vidéos « les fondamentaux » du réseau Canopé (prévu pour niveau cycle 3) :
 - <https://www.reseau-canope.fr/lesfondamentaux/discipline/sciences.html>
- Vidéo de la série « Kezako » : <https://www.youtube.com/watch?v=gpJaalcC8k8>





Activité 1 : La machine Soleil (documentaire)

1.1. Généralités

L'objectif de cette activité est de décrire l'origine de l'énergie fournie par le Soleil à la Terre. À partir de la puissance rayonnée par la Soleil, nous pourrons également déterminer la perte de masse solaire chaque seconde à l'aide de la relation d'Einstein $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.

Cette activité permet de réinvestir les savoir-faire concernant les transformations nucléaires vues dans le programme de 2nde de Physique-Chimie et le thème 1 d'Enseignement Scientifique ainsi que la relation entre la puissance et l'énergie vue depuis le Cycle 4.

Objectifs notionnels :

- L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène qui se produisent dans les étoiles les maintient à une température très élevée ;
- Du fait de l'équivalence masse-énergie (relation d'Einstein), ces réactions s'accompagnent d'une diminution de la masse solaire au cours du temps.

Objectifs méthodologiques :

- Déterminer la masse solaire transformée chaque seconde en énergie à partir de la donnée de la puissance rayonnée par le Soleil.

Durée : Entre 20 et 30 min correction comprise.

Autre compétence mobilisable dans cette activité :

- Utilisation du calcul littéral.

1.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Texte agrémenté d'une vue d'artiste du satellite Solar Orbiter passant devant le Soleil incandescent.
Le but de ce document est de rappeler que le Soleil est un astre incandescent : il émet de la lumière à cause de sa température. Cette énergie est transmise sous forme de rayonnement jusqu'à la Terre avec une puissance surfacique moyenne sur Terre de $1\ 360\ W \cdot m^{-2}$. La puissance solaire est donc de $3,85 \times 10^{26}\ W$. (Calcul détaillé en exercice expert).
- **Document 2** : Schéma récapitulatif des fusions nucléaires des noyaux d'hydrogène au sein du Soleil.
- **Document 3** : Texte rappelant la relation d'Einstein $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Elle est plus connue sous sa forme $E = m \cdot c^2$. Mais il s'agit bien d'une perte d'énergie qui entraîne une perte de masse d'où la nécessité de noter les deltas symbolisant la différence entre 2 états. La perte d'énergie du Soleil entraîne donc une perte de masse de celui-ci.

**Ressources complémentaires :**

- Vidéo MOOC Explora Univers, présentation de la réaction de fusion nucléaire :
<https://webtv.univ-nantes.fr/fiche/6451/mooc-explorunivers-3-le-soleil-et-les-etoiles-le-soleil-une-source-de-chaleur-infinie>

1.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La relation permettant de calculer l'énergie transférée E en fonction de la puissance P et de la durée Δt est : $E = P \cdot \Delta t$.

Question 2 :

- 1^{ère} transformation nucléaire : ${}^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + {}^1_1e + \gamma$;
- 2^{ème} transformation nucléaire : ${}^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$;
- 3^{ème} transformation nucléaire : ${}^2 {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^1_1H$;
- Le bilan global de cette transformation nucléaire est : $4 {}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^1_1e + 2 \gamma$.

Question 3 :

- La quantité d'énergie rayonnée par le Soleil chaque seconde est :
$$E = P \cdot \Delta t = 3,85 \times 10^{26} \times 1 = 3,85 \times 10^{26} \text{ J};$$
- La diminution de masse solaire par seconde est :
$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{3,85 \times 10^{26}}{(3,00 \times 10^8)^2} = 4,28 \times 10^9 \text{ kg}$$



Activité 2 : À la surface du Soleil (documentaire)

2.1. Généralités

L'objectif de cette activité est de déterminer la température de surface du Soleil et par conséquent le type spectral de notre étoile à partir d'une analyse spectrale.

Objectifs notionnels :

- Comme tous les corps matériels, les étoiles et le Soleil émettent des ondes électromagnétiques et donc perdent de l'énergie par rayonnement ;
- Le spectre du rayonnement émis par la surface (modélisé par un spectre de corps noir) dépend seulement de la température de surface de l'étoile ;
- La longueur d'onde d'émission maximale est inversement proportionnelle à la température absolue de la surface de l'étoile (loi de Wien).

Objectifs méthodologiques :

- À partir d'une représentation graphique du spectre d'émission du corps noir à une température donnée, déterminer la longueur d'onde d'émission maximale ;
- Appliquer la loi de Wien pour déterminer la température de surface d'une étoile à partir de la longueur d'onde d'émission maximale.

Durée : 15-20 min correction comprise.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Lecture et exploitation de graphiques.

2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Sur la partie gauche, on observe les spectres d'émissions d'objets incandescents à différentes températures (3 500 K de 5 500 K avec un pas de 500 K). Sur la partie de droite se trouve le spectre d'émission du Soleil.
Ce document permet également d'introduire une expression de la loi de Wien. Cette loi permet d'exprimer la longueur d'onde λ_{\max} du maximum d'émission de lumière :
$$\lambda_{\max} = \frac{k}{T}$$
- **Document 2** : Représentation de la classification de Harvard avec les 7 principaux types spectraux. Les spectres d'émission des étoiles sont représentés en fonction de leur type spectral.

Ressources complémentaires :

- Vidéo MOOC Explora Univers, *Les différents types spectraux des étoiles* : <https://webtv.univ-nantes.fr/fiche/6451/mooc-explorunivers-3-le-soleil-et-les-etoiles-le-soleil-une-source-de-chaleur-infinie>
- Animation spectre d'un corps noir :
https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html



2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La longueur d'onde pour laquelle le Soleil émet le plus d'énergie est par lecture graphique d'environ 500 nm.

Question 2 : La température de surface du Soleil est donc un peu supérieure à 5 500 K. Par le calcul, on trouve :

$$T = \frac{k}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-9}} = 5,80 \times 10^3 \text{ K}$$

Question 3 : Comme la température de surface du Soleil est de 5 800 K environ alors son type spectral est G selon la classification de Harvard.

Activité 3 : L'énergie solaire inégalement répartie sur Terre (activité de groupes)

3.1. Généralités

Le but de cette activité de groupes est de déterminer les facteurs expliquant la répartition inégale de l'énergie d'origine solaire sur Terre. Cette activité expérimentale se décompose en 4 parties :

- Une partie commune à l'ensemble des groupes ;
- Un groupe travaillant sur l'influence de l'heure de la journée ;
- Un groupe travaillant sur l'influence de la latitude ;
- Un dernier groupe travaillant sur l'influence du moment de l'année.

Plusieurs organisations peuvent être possibles en fonction du temps consacré à cette activité. Cela peut être sous la forme de TP tournant et l'ensemble des élèves fera à tour de rôle le travail des différents groupes. Possible sur un créneau de 2h consécutives.

Une autre possibilité est que chaque groupe travaille uniquement sur l'influence d'un seul paramètre, en prévoyant le temps d'effectuer une restitution des résultats à l'ensemble de la classe.

Il est souhaitable que cette activité soit réalisée dans la mesure du possible en effectif réduit. Sachant que les activités 1 et 2 de ce chapitre peuvent être faites en autonomie sur un créneau d'une heure. Il y a possibilité peut-être de ne garder qu'une demi-classe et d'envoyer le reste de la classe faire ce travail en autonomie au CDI. Et ensuite d'inverser les groupes.

Il y a même possibilité de se servir de cette activité dans le cadre du projet expérimental et numérique. Grâce à la version numérique du manuel, les élèves peuvent enregistrer la synthèse de leur recherche. Cela peut donc aussi faire l'objet d'un travail déporté.

Objectifs notionnels :

- 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 ;
- De ce fait, 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).

Objectifs méthodologiques :

- Sur un schéma, identifier les configurations pour lesquelles la puissance reçue par une surface est maximale ou minimale ;
- Analyser, interpréter et représenter graphiquement des données de températures. Calculer des moyennes temporelles de températures. Comparer des distributions temporelles de températures.

Durée : 1 heure si travail sur l'influence d'un seul paramètre ; 2 heures si travail en TP tournant.

3.2. Présentation des documents

Documents communs à tous les groupes

- **Document 1** : Il s'agit de la représentation de l'influence de l'angle d'incidence d'un objet sur une zone d'ombre. Ce qui permettra de faire le lien avec la rotundité de la Terre pour la réception de l'énergie solaire en fonction de la latitude.
- **Document 2** : Schéma du protocole expérimental permettant de mesurer l'éclairement en fonction de l'angle d'incidence.

Ensemble documentaire Groupe 1 : Une réception inégale suivant l'heure de la journée

Présentation des documents :

- **Document 3** : Graphique présentant un relevé de température et de puissance solaire reçue en fonction de l'heure du jour en Normandie.
- **Document 4** : Schéma permettant le tracé de la position apparente du Soleil ainsi que ce tracé pour l'automne.
- **Document 5** : Graphique présentant le bilan énergétique du sol terrestre. On observe logiquement que le sol reçoit plus d'énergie qu'il n'en émet au cours de la journée et cela s'inverse la nuit.

Suggestions de questions :

- **Document 3** :
 - Décrire l'évolution de la puissance solaire reçue au sol au cours de la journée.
 - Pourquoi cette puissance est nulle à certains moments ?
 - Comparer l'évolution de la température à celle de la puissance solaire.
 - À quel moment de la journée la puissance solaire reçue au sol est-elle maximale ?
 - En est-il de même pour la température ?
- **Document 4** :
 - À quel moment de la journée la puissance solaire reçue est maximale ?
 - Où se situe le Soleil dans le ciel ?





- Quel phénomène astronomique est responsable de la variation de la puissance solaire reçue sur Terre au cours de la journée ?

Sources :

- Document 5 : *Question 12 : Quel est le bilan de chaleur au cours de la journée ?, Lunon, 2007, <https://www.extrem-network.com/lunon/Questions/003.htm>*

Ensemble documentaire Groupe 2 : Une inégale répartition suivant la latitude

Présentation des documents :

- **Document 6** : Représentation des températures moyennes sur l'ensemble du globe (à gauche) et carte des différents climats (à droite).
- **Document 7** : Répartition de faisceaux lumineux provenant du Soleil en fonction de la latitude.
- **Document 8** : Représentation des puissances surfaciques reçues sur une année pour l'ensemble du globe.

Suggestions de questions :

- **Document 6** :
 - Comment évolue la température en fonction de la latitude ?
 - En déduire si cela a une influence sur le climat ?
- **Documents 6 et 8** : Quel est le lien entre le planisphère des températures et la carte mondiale de l'insolation terrestre ?
- **Document 7** : Comment varie la surface du faisceau lumineux en fonction de la latitude ?
- Quel phénomène astronomique est responsable de la variation de la puissance solaire reçue sur Terre en fonction de la latitude ?

Sources :

- *Les climats du monde, Larousse, https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat_les_climats_du_monde/185927*
- *Évolution saisonnière de l'insolation et de la température en un lieu donné, Pierre Thomas, Planet Terre, 2000, <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/energie-temperature2.xml>*

Ensemble documentaire Groupe 3 : Une inégale répartition suivant le moment de l'année

Présentation des documents :

- **Document 9** : Répartition des températures sur le globe au solstice d'été (en haut) et au solstice d'hiver (en bas).





- **Document 10 :** Positions de la Terre autour du Soleil au cours d'une année (le caractère sphérique de la trajectoire ainsi que l'excentricité du Soleil dans l'ellipse ont été exagérés).

Suggestions de questions :

- **Document 9 :**
 - Comparer les valeurs des températures dans l'hémisphère nord entre le solstice d'été et le solstice d'hiver.
 - Même question pour l'hémisphère sud. Que peut-on en conclure ?
- **Document 10 :**
 - Au solstice d'été dans l'hémisphère nord , le jour dure-t-il plus longtemps que la nuit ? Même question au solstice d'hiver.
 - Comment varie la puissance surfacique d'exposition au cours de l'année ? Dans quel hémisphère se situe-t-on ? Quelle serait l'allure de ces courbes dans l'hémisphères sud ?
- Que peut-on dire de la variation de la puissance surfacique d'exposition en fonction de la latitude ?
- Quel phénomène astronomique est responsable de la variation de la puissance solaire reçue sur Terre en fonction du moment de l'année ?

Sources :

- Le site de la NASA,
https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD_LSTD_CLIM_M&date=2001-01-01
- *Earth-Sun Relationships and Insolation*, Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition, Pidwirny, M., 2006, <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6i.html>

3.3. Questions et indicateurs de réussite

Questions :

1. Les facteurs influençant la puissance solaire reçue par une surface terrestre donnée sont :

- L'heure de la journée ;
- Le moment de l'année ;
- La latitude ;

Autres paramètres pouvant être donnés mais faux :

- La distance d'une région au Soleil ;
- La position de la Terre par rapport au Soleil (lié à la 1ere proposition) ;
- La présence ou non de nuage ;
- La pollution.

2.

- **Groupe 1 :** La puissance solaire reçue dépend de l'heure dans la journée. Plus le Soleil est haut dans le ciel, plus la puissance solaire reçue sur Terre est importante. Cela est dû à la rotation de la Terre sur elle-même.
- **Groupe 2 :** La puissance solaire reçue dépend de la latitude à laquelle on se trouve. Plus on se rapproche de l'équateur plus la surface de répartition de l'énergie solaire est faible donc plus la température est élevée. Plus on se rapproche des pôles, plus la surface de répartition de l'énergie solaire est grande et plus la température est faible. Cela a une incidence sur les





climats. Cela est dû à la sphéricité de la Terre.

- **Groupe 3 :** La puissance solaire reçue dépend du moment de l'année. Cela est dû à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. Ce phénomène est responsable de la durée changeante au cours de l'année de la durée du jour et de la nuit et donc également de l'alternance des saisons. Remarque contrairement aux idées reçues, lorsque c'est l'hiver dans l'hémisphère, la Terre est au plus proche du Soleil. À noter également que les saisons sont inversées entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud.

Indicateurs de réussite :

- **Groupe 1 :**
 - 1. Avoir décrit par un mode de communication adapté les variations de température au cours d'une journée : réalisation du graphique pour présenter les résultats.
 - 2. Avoir identifié un facteur explicatif à ces variations journalières : l'énergie solaire reçue donc la température varie en fonction du moment de la journée, elle est à son maximum lorsque le Soleil est au zénith. Cela s'explique par la rotation de la Terre sur elle-même.
 - 3. (ORAL) Avoir communiqué, de façon rigoureuse, ces résultats au reste de la classe : explications claires et argumentées.
- **Groupe 2 :**
 - 1. Avoir comparé les températures moyennes à la surface aux valeurs moyennes de puissance reçue par unité de surface : comparaison des surfaces éclairées par la lampe.
 - 2. Avoir proposé une explication à aux différences constatées suivant la latitude : l'énergie solaire reçue varie en fonction de la latitude. Plus la latitude est grande plus l'énergie solaire reçue s'étend sur une grande surface et donc fait baisser les températures. Cela est due à la sphéricité de la Terre.
 - 3. (ORAL) Avoir communiqué de façon claire et concise les arguments et la conclusion au reste de la classe : explications claires et argumentées.
- **Groupe 3 :**
 - 1. Avoir identifié les variations de température et d'insolation d'un hémisphère donné en fonction de la saison : diminution de l'insolation totale sur une année et augmentation de l'amplitude des températures lorsque l'on s'éloigne de l'équateur.
 - 2. Avoir émis une hypothèse explicative à cette observation et testé cette hypothèse sur un modèle analogique : Plus les jours sont longs, plus l'énergie solaire reçue est grande. Or la durée du jour varie au cours de l'année donc l'énergie solaire varie également en fonction du moment de l'année. C'est ce qui explique l'alternance des saisons. Cela est dû à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique.
 - 3. (ORAL) Avoir communiqué de façon claire et concise les arguments et la conclusion au reste de la classe : explications claires et argumentées.





3.4. Protocoles expérimentaux

TP Groupe 1 :

Matériel :

- Thermomètre ;
- Ordinateur avec un tableur.

Protocole : Relever la température à différents moments de la journée.

Résultat attendu : Un relevé de température en fonction de l'heure dans la journée est attendu avec réalisation d'un graphique. Cette manipulation peut être en lien avec le projet expérimental et numérique.

TP Groupe 2 :

Matériel :

- Globe terrestre ;
- Projecteur ou lampe de poche ;
- Système réglable pour porter le projecteur à hauteur voulue ;
- Papier millimétré ;
- Scotch ;
- Thermomètre (optionnel).

Protocole : La manipulation à reproduire est celle montrée dans le doc.8. À l'aide d'un globe terrestre et d'une lampe, l'élève pourra dessiner la surface éclairée par le faisceau de la lampe en fonction de la latitude.

Résultat attendu : En comparant les aires, il pourra observer qu'une même quantité d'énergie lumineuse ne chauffera pas la même surface car cette surface augmente avec la latitude. Une mesure de températures au centre de la surface éclairée peut également être effectuée. Cette partie peut aussi faire l'objet du projet expérimental et numérique.

TP Groupe 3 :

Matériel :

- Globe terrestre ;
- Projecteur ou lampe de poche ;
- Système réglable pour porter le projecteur à hauteur voulue ;
- Papier millimétré ;
- Scotch ;
- Thermomètre (optionnel).

Protocole : Pour la manipulation, il faut, pour une lampe fixe, faire varier l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique pour un même lieu.

Résultat attendu : L'élève pourra alors remarquer que plus l'axe de rotation de la Terre est incliné, plus la durée du jour en un lieu augmentera si on se situe au solstice d'été. C'est l'inverse si on se situe au solstice d'hiver. Un relevé de températures peut également être effectué. Là aussi cette manipulation peut être associée au projet expérimental et numérique.



Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Une anomalie de température

Compétence principalement travaillée : Analyser des données de températures.

Correction :

1. En un point donné, la température diminue jusqu'à atteindre un minimum puis augmente ensuite. Le phénomène dure environ 1 heure.
2. Ce phénomène se déplace d'ouest en est. Les températures diminuent d'abord sur la côte Ouest des États-Unis puis vers le centre et enfin sur la côte Est.
3. Les variations de températures au cours de la journée sont dues à une éclipse solaire. En effet, le Soleil a disparu au cours de la journée, caché par la Lune, et donc la température sur la trajectoire de l'éclipse diminue lorsque la ville passe dans la pénombre jusqu'à ce que l'éclipse soit totale puis augmente de nouveau jusqu'à la sortie de la pénombre.

Ressources complémentaires :

- *Globe Observer Quick Data Viz - 5 Min Intervals with Eclipse Shadow*, Nasa Globe Observer, 2017, <https://youtu.be/yiNF1PEV5f8>
- *Observer le globe*, The Globe Program : <https://observer.globe.gov/fr>

Exercice 2 : La température de Sirius

Compétence principalement travaillée : Appliquer la loi de Wien pour déterminer la température de surface d'une étoile ; utiliser le calcul littéral.

Correction :

1. La longueur d'onde pour laquelle l'intensité lumineuse émise par Sirius est maximale à 230 nm pour la courbe permettant de déterminer la température de surface de l'étoile (en noir) et à 375 nm pour le spectre d'émission de Sirius.

2. La température de surface approximative de Sirius d'après la courbe est :

$$T = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{\lambda_{\max}} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{230 \times 10^{-9}} = 1,3 \times 10^4 \text{ K}$$

Pour une température réelle d'environ 9 900 K d'après les valeurs tabulées.

Ressource complémentaire : Simulation Blackbody Spectrum,
https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html

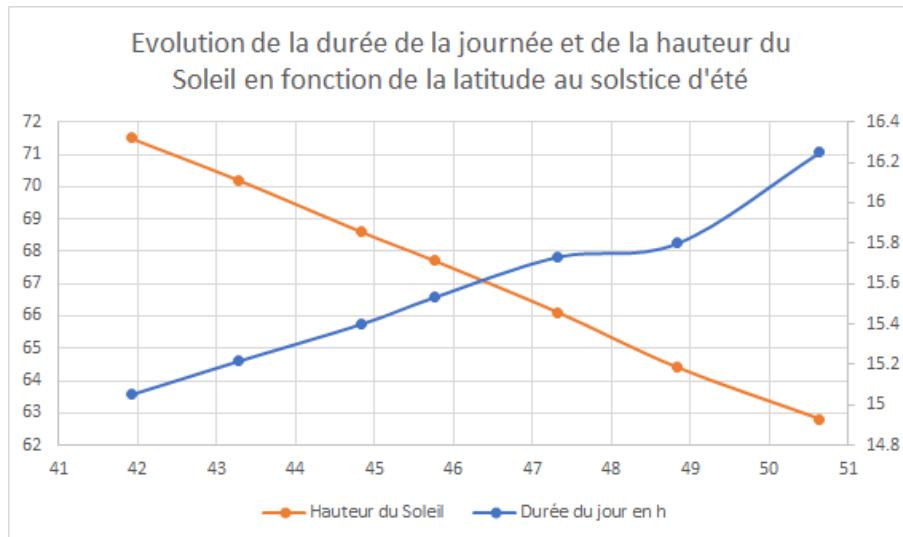
4.2. Le repaire des initiés

Exercice 3 : Les variations saisonnières selon les villes

Compétence principalement travaillée : Traduire des informations sous forme graphique.

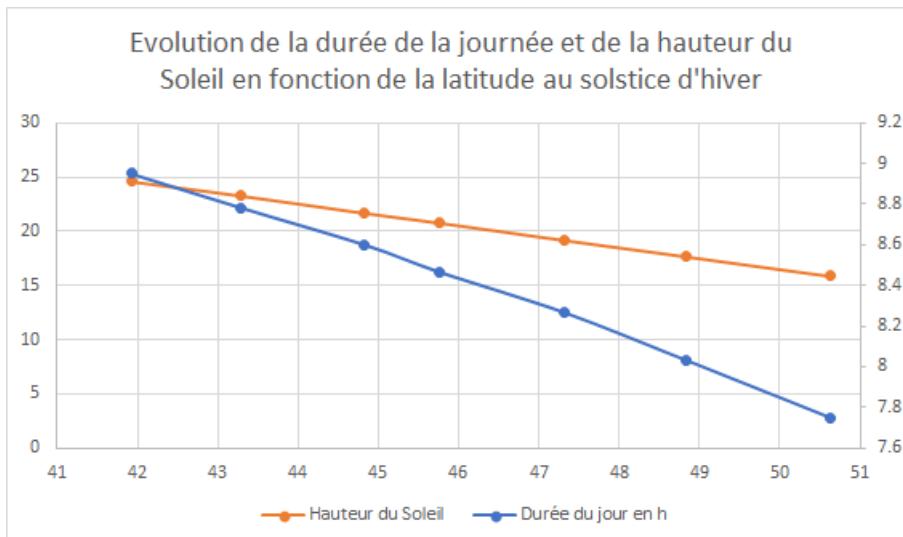
Correction :

1.



Au solstice d'été, plus la latitude est élevée, plus le jour est long, mais moins le Soleil est haut dans le ciel, donc on reçoit moins d'énergie solaire.

2.



Au solstice d'hiver, plus la latitude est élevée, plus le jour est court et moins le Soleil est haut dans le ciel. À cette date-là aussi, plus la latitude est élevée moins on reçoit d'énergie solaire.

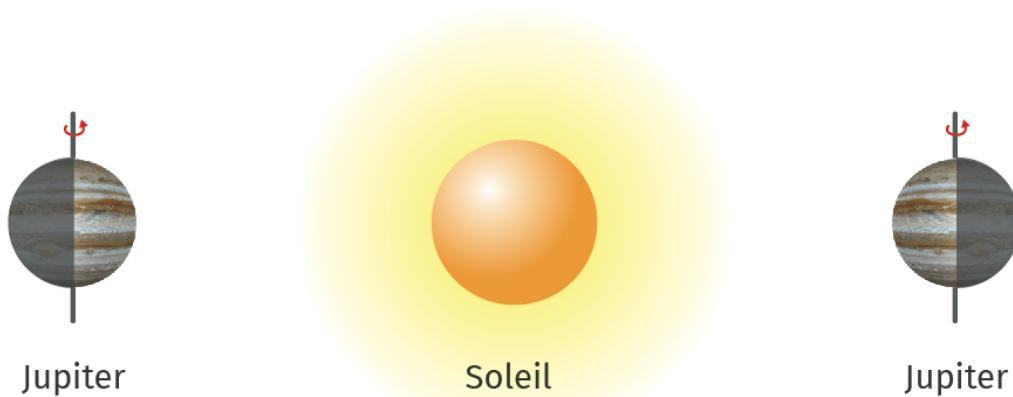
Exercice 4 : Des planètes sans saison

Compétence principalement travaillée : Sur un schéma, identifier les configurations pour lesquelles la puissance reçue par une surface est maximale ou minimale.

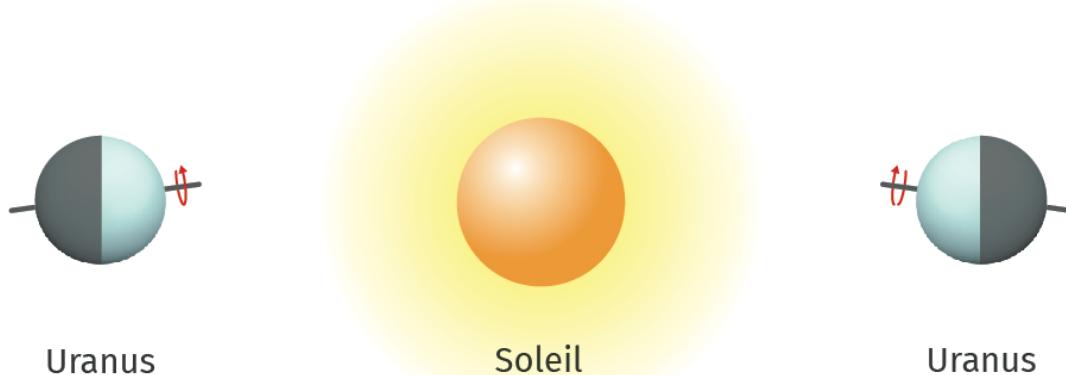
Correction :

1. La conséquence de l'inclinaison de $23,5^\circ$ de l'axe de rotation de la Terre est une variation de l'ensoleillement au cours de l'année. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est donc à l'origine des saisons.

2. Pour Mercure, Vénus et Jupiter on constate que la durée du jour est quasiment équivalente à la durée de la nuit tout au long de la trajectoire autour du Soleil, par conséquent présentent des saisons peu marquées.



3. La très forte inclinaison de l'axe de rotation d'Uranus entraîne que cette planète montre presque toujours le même côté au Soleil par conséquent il y a une partie de la planète qui est toujours face au Soleil et une partie de la planète qui est toujours dans la nuit. Uranus roule sur sa trajectoire.





Exercice 5 : Proxima Centauri

Compétence principalement travaillée : Déterminer la masse d'une étoile transformée chaque seconde en énergie à partir de la donnée de la puissance rayonnée ; utiliser le calcul littéral.

Correction :

1. L'énergie rayonnée chaque seconde par Proxima Centauri est :

$$E = P \cdot \Delta t = 6,9 \times 10^{23} \times 1 = 6,9 \times 10^{23} \text{ J}$$

2. La masse perdue chaque seconde par Proxima Centauri est :

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{6,9 \times 10^{23}}{(3,00 \times 10^8)^2} = 7,7 \times 10^6 \text{ kg}$$

Exercice 6 : Caractéristiques du globe et répartition de l'énergie solaire

Compétence principalement travaillée : Restituer et organiser ses connaissances.

Correction :

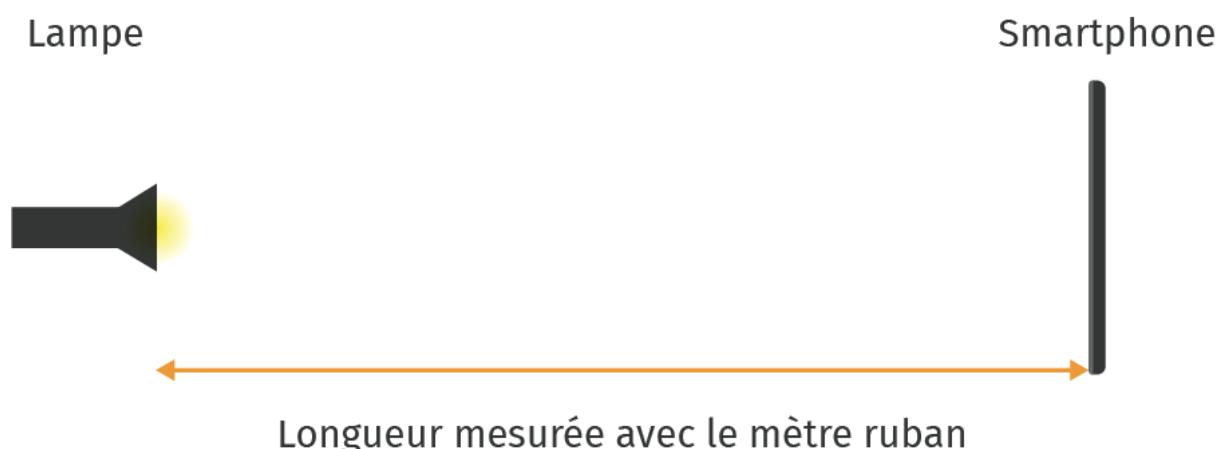
| | Selon l'heure | Selon le moment de l'année | Selon la latitude |
|---|---|--|--|
| Caractéristiques du globe terrestre expliquant les variations de répartition de l'énergie solaire | Rotation de la Terre sur elle-même. | Inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à l'écliptique. | Sphéricité de la Terre. Le rayonnement solaire ne frappe pas la Terre avec la même surface au sol. |
| Conséquences sur la répartition de l'énergie solaire à la surface de la Terre | Il fait plus chaud le jour (face au Soleil) que la nuit (dans l'ombre). | Apparition de saisons, la durée du jour et de la nuit ne sont pas égales en fonction du moment dans l'année. | Plus la latitude est élevée plus l'énergie solaire surfacique reçue est faible. |

Exercice 7 : Inégale répartition de l'énergie solaire entre l'équateur et les pôles

Compétence principalement travaillée : Concevoir un protocole expérimental.

Correction :

1. Schéma du protocole expérimental :



2. $6\ 371\ \text{km} << 149,6 \times 10^6\ \text{km}$. Pour décaler le smartphone de 1 cm entre les 2 positions, il faudrait positionner la lampe à 234 m. Cette expérience est donc difficilement réalisable à cause de la luminosité parasite d'autres sources extérieures. Donc, on peut considérer que cet écart de 6 371 km n'est pas significatif et que ce n'est pas la différence de distance entre le pôle et l'équateur qui explique les différences de température.

| | |
|--------------------------------|---|
| $149,6 \times 10^6\ \text{km}$ | $l = \frac{149,6 \times 10^6 \times 1,00 \times 10^{-2}}{6\ 371} = 234\ \text{m}$ |
| 6 371 km | 1 cm |

Exercice 8 : Variations climatiques passées

Compétence principalement travaillée : Saisir des informations et les mettre en relation.

Correction :

Les changements climatiques pourraient être dus à plusieurs causes :

- Les variations de la quantité de dioxyde de carbone gazeux dans l'atmosphère ;
- Les variations de la quantité d'énergie lumineuse reçue sur Terre à cause de phénomènes astronomiques : la variation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur l'écliptique (précession des équinoxes) et la variation de l'ellipticité de l'orbite de la Terre.



4.3. Le coin des experts

Exercice 9 : La loi de Stefan-Boltzmann

Compétence principalement travaillée : Saisir des informations et les mettre en relation.

Erratum : L'unité de la constante σ de la loi de Stefan-Boltzmann est $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ au lieu de $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Correction :

1. La température de surface du Soleil est :

$$T = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{\lambda_{\max}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-9}} = 5,80 \times 10^3 \text{ K}$$

2. La puissance surfacique du rayonnement solaire est :

$$P_{\text{surface}} = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times (5,80 \times 10^3)^4 = 6,42 \times 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

3. La puissance du rayonnement solaire est :

$$P_{\text{Soleil}} = P_{\text{surface}} \cdot S = P_{\text{surface}} \times 4\pi r_{\text{Soleil}}^2 = 6,42 \times 10^7 \times 4\pi \times (6,955 \times 10^8)^2 = 3,90 \times 10^{26} \text{ W}$$

Dans l'activité 1, il est indiqué que $P_{\text{Soleil}} = 3,85 \times 10^{26} \text{ W}$. Le résultat trouvé est donc cohérent.

Exercice 10 : Des ensoleilements journaliers différents

Compétence principalement travaillée : Interpréter des résultats et en tirer des conclusions ; Identifier des outils et les mettre en œuvre dans une démarche scientifique.

Correction :

1. Un diagramme cylindrique permet d'avoir une projection en deux dimensions de la trajectoire apparente du Soleil dans le ciel. Il permet de suivre et de comparer facilement différentes trajectoires du Soleil à différents endroits du globe et à différents jours de l'année.

À un moment donné, plus la hauteur du Soleil est importante, plus la puissance solaire reçue est importante.

2. Pour Uccle, l'ensoleillement augmente de janvier à juin puis diminue de juillet à décembre. Plus le Soleil est haut dans le ciel plus le jour dure longtemps et plus l'énergie solaire reçue est grande.

Dans l'hémisphère Nord, à cause de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, l'inclinaison des rayons du Soleil avec la surface de la Terre augmente de Janvier à Juin, puis diminue jusqu'à Décembre. Cela explique l'observation des variations de la hauteur du Soleil au cours de l'année.

3. Pour Nîmes, l'évolution de l'ensoleillement est le même que pour Uccle. Le Soleil se situe cependant un peu plus haut à Nîmes qu'à Uccle ce qui a pour conséquence qu'il fait plus chaud à Nîmes qu'à Uccle.

4. Plus le Soleil est haut dans le ciel, plus le jour dure longtemps et plus l'ensoleillement sera important. Plus l'aire du diagramme solaire cylindrique est grande, plus l'ensoleillement sera également important.



4.4. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

BIENTÔT DISPONIBLE.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 5 : Le bilan radiatif terrestre

Introduction

Présentation

« Le bilan radiatif solaire » est un chapitre qui s'inscrit dans le prolongement du chapitre sur le rayonnement solaire. Après avoir vu l'origine de l'énergie solaire, l'élève détermine, dans ce chapitre la quantité d'énergie solaire reçue par le globe terrestre puis son devenir, depuis le sommet de l'atmosphère jusqu'à la surface du globe.

Il travaille ensuite sur l'énergie émise par la Terre sous forme de rayonnements infrarouges. En bilan, il est amené à travailler sur l'équilibre dynamique thermique qui s'établit à la surface de la Terre démontrant l'existence d'une température moyenne au sol constante.

L'identification des différents acteurs de ce bilan thermique est fondamentale puisqu'elle conditionne la compréhension de l'évolution du climat et de sa perturbation par l'humanité ; deux notions qui seront étudiées en classe de terminale.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

Au cours du cycle 3 et cycle 4, la Terre est replacée au sein du système solaire et les élèves sont amenés à comprendre comment l'énergie solaire reçue par le globe conditionne les conditions thermiques de surface.

Bibliographie

- Le Treut H., Jancovici - Dominos J-M., *L'effet de serre : allons-nous changer le climat ?*, Flammarion, Paris, 2001.
- Chapel A., Fieux M., Jacques G., Jacques J-M., Lava K.I, Letreut H., *Océans et Atmosphère*, coll. « Synapses », Hachette Éducation, 1996.
- John E. Frederick, *Sciences de l'atmosphère, une introduction*, coll. « De Boeck », Paris, 2011.
- Hoffert M. and al., *Sciences de la Terre et de l'Univers*, coll. « Vuibert », Paris, 2014.

Sitographie

- <http://omer7.sedoo.fr>
Site développé par l'académie de Toulouse proposant des animations sur l'atmosphère.



- <http://education.meteofrance.fr>
Site de météo france propose des dossiers pédagogiques divers en lien avec l'atmosphère.
- https://www.canal-u.tv/video/canal_uved/8_changement_climatique_l_ocean_et_ses_services_ecosystemiques_19883
Site qui permet d'avoir accès à une série de vidéos sur le climat.
- http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/IUFM_Creteil/DufresnePhyAtmLamap.pdf
Un document qui permet de refaire le point sur la physique de l'atmosphère, document accessible et bien construit.





Activité 1 : Le bilan radiatif de la Terre et les acteurs en jeu (documentaire)

1.1. Généralités

L'objectif est de faire identifier aux élèves les différents acteurs du bilan radiatif terrestre. Ils seront alors à même d'initier un schéma bilan qui sera complété au cours des différentes activités du chapitre.

Lien au programme :

Voulant faire découvrir l'ensemble des acteurs du bilan radiatif terrestre, cette activité fait appel à l'ensemble des notions du chapitre.

Cette activité s'inscrit dans la compétence « Pratiquer des langages » : les élèves débutent la réalisation d'un schéma bilan. Ils devront ainsi lister les éléments à faire figurer sur le schéma et envisager des modes de représentation adaptés. Le document 4 de l'activité est une proposition de schéma pouvant être utilisé.

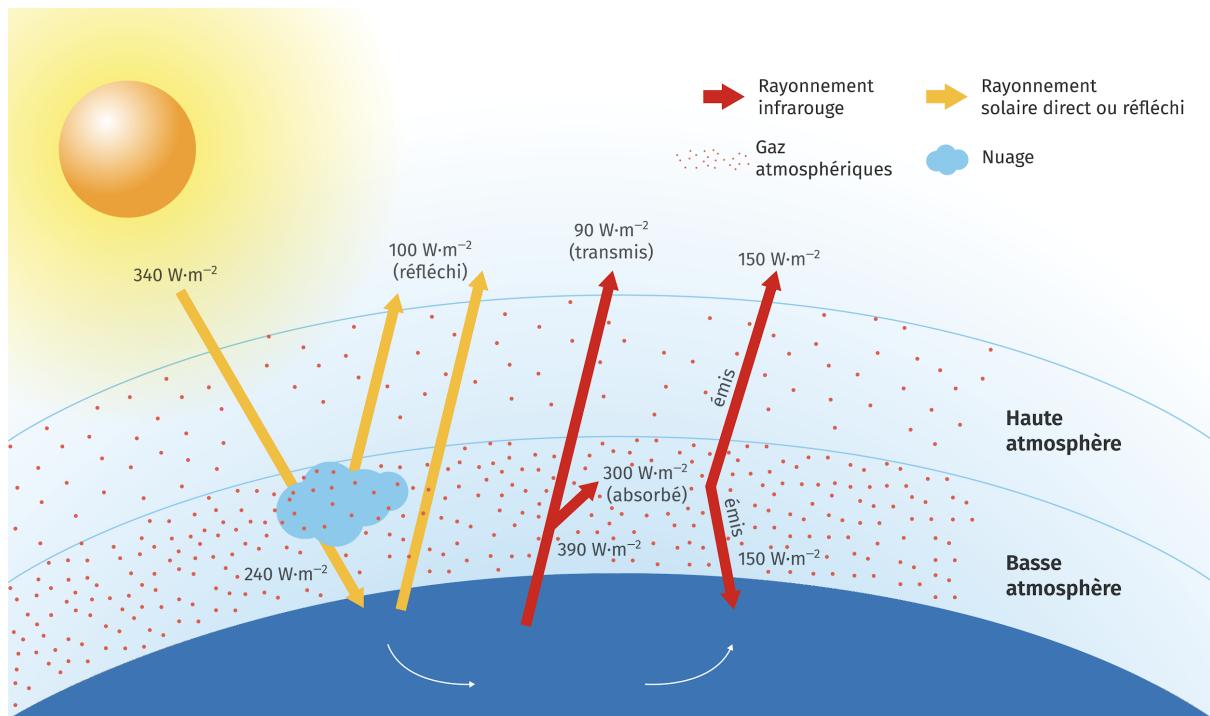
Durée : En une demi-heure les élèves pourront poser les bases du chapitre.

1.2. Présentation des documents

Document d'appel : D'emblée, la notion de température constante à la surface de la Terre est posée de façon à donner un objectif clair aux élèves.

- **Document 1** : Il présente l'organisation générale de l'atmosphère : son épaisseur et sa répartition en gaz.
- **Document 2** : Le document présente la composition en gaz de l'atmosphère et permet une première description des gaz à effet de serre. Les élèves peuvent en particulier noter qu'ils ne représentent que 0,043% des gaz atmosphériques.
- **Document 3** : Cette vue met en évidence la nature variée de la surface terrestre : eau, végétation, sable, glace. Elle permet de mettre en avant des comportements différents de ces surfaces vis à vis des rayonnements solaires incidents.
- **Document 4** : Le document est une proposition de schéma qui pourra être complété par les élèves au cours des différentes activités.

1.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues





Activité 2 : L'énergie solaire : du Soleil jusqu'à la Terre

2.1. Généralités

Cette activité s'inscrit dans la continuité du chapitre précédent. Un prérequis incontournable de l'activité est l'origine de l'énergie qui atteint la Terre, ainsi que son mode de transmission.

Dans cette activité, les élèves vont déterminer, de manière progressive, la fraction de la puissance émise par le Soleil qui est interceptée par la Terre. À l'aide d'un schéma, ils déterminent dans un premier temps l'aire de la sphère sur laquelle se répartit le rayonnement solaire au niveau de la Terre. Dans un second temps, à l'aide d'une modélisation du système solaire, ils déterminent l'aire du disque sur lequel la Terre intercepte le rayonnement solaire. La synthèse de l'exercice consiste à leur faire calculer le rapport des deux surfaces pour déterminer la proportion de la puissance émise par le Soleil interceptée par la Terre.

Lien au programme :

- Cette activité concerne le premier savoir et le premier savoir-faire du programme BO :
 - Savoirs : « La proportion de la puissance totale, émise par le Soleil et atteignant la Terre, est déterminée par son rayon et sa distance au Soleil » ;
 - Savoir-faire : « En s'appuyant sur un schéma, calculer la proportion de la puissance émise par le Soleil qui atteint la Terre ».

Durée : 30 minutes.

2.2. Présentation des documents

- **Document 1** : Ce texte présente les caractéristiques du rayonnement solaire. Il insiste sur le fait que la puissance traversant les couches sphériques concentriques (centrées sur le Soleil) reste constante.
- **Document 2** : Ce schéma représente le Soleil et la Terre, ainsi que le rayonnement solaire. Il permet aux élèves d'avoir une représentation mentale de la répartition du rayonnement solaire d'une part, et d'autre part de s'en servir dans la suite du chapitre pour effectuer à nouveau le calcul.
- **Document 3** : Ce schéma reconstitue une expérience permettant de visualiser la surface sur laquelle est interceptée le rayonnement solaire au niveau de la Terre.

2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : D'après le document 1, la puissance solaire se répartit, à une distance D du Soleil, sur la sphère centrée de rayon D sur le Soleil. La surface de cette sphère est, d'après la formule donnée, $4\pi \cdot D^2$.

Question 2 : Raphaëlle cherche à modéliser le rayonnement solaire dans l'espace et son interception par la Terre. La lampe sert à modéliser la source lumineuse qu'est le Soleil, la balle de golf permet de modéliser la Terre et la feuille permet de visualiser la surface sur laquelle la Terre intercepte le rayonnement solaire.



Question 3 : Sur le document 3, on constate que l'ombre est un disque dont le rayon est égal à celui de la balle de golf. De manière analogue, on en déduit que la Terre intercepte le rayonnement solaire sur un disque dont le rayon est égal à celui de la Terre. Cette surface possède une aire dont l'expression littérale est $\pi \cdot R_T^2$, où R_T est le rayon de la Terre.

Question 4 : Au niveau de la Terre (située à une distance D du Soleil), la puissance solaire est répartie sur une sphère de rayon D , dont la surface vaut $4\pi \cdot D^2$ (question 1). De toute cette puissance, la Terre en intercepte une partie, sur une surface égale à $\pi \cdot R_T^2$ (question 3).

La proportion de la surface solaire interceptée par la Terre est égale au quotient des deux grandeurs précédentes,

à savoir

$$\frac{\pi \cdot R_T^2}{4\pi \cdot D^2} = \left(\frac{R_T}{2D}\right)^2.$$

L'application numérique donne : $\left(\frac{6371}{2 \times 1,5 \times 10^8}\right)^2 = 4,5 \times 10^{-10}$.





Activité 3 : L’albédo : un paramètre très important pour le climat

3.1. Généralités

Cette activité est la suite logique de l’activité précédente : après avoir déterminé la proportion du rayonnement solaire intercepté par la Terre, les élèves ont la possibilité de s’interroger sur le devenir de ce rayonnement. Le but de cette activité est double :

Tout d’abord, l’activité introduit la notion d’albédo, et permet aux élèves de s’interroger sur la part des rayonnements solaires incidents réfléchis vers l’espace, en fonction de sa valeur.

Ensuite, par un exemple historique, l’activité invite les élèves à s’interroger sur l’importance très élevée de l’albédo sur le climat, et les conséquences qu’entraîne une augmentation ou une diminution de l’albédo de la Terre.

Lien au programme :

- Cette activité permet de traiter le deuxième savoir et le deuxième savoir-faire au programme :
 - Savoir : « Une fraction de cette puissance, quantifiée par l’albédo terrestre moyen, est diffusée par la Terre vers l’espace, le reste est absorbé par l’atmosphère, les continents et les océans » ;
 - Savoir-faire : « L’albédo terrestre étant donné, déterminer la puissance totale reçue par le sol de la part du Soleil. »

Durée : 30 minutes.

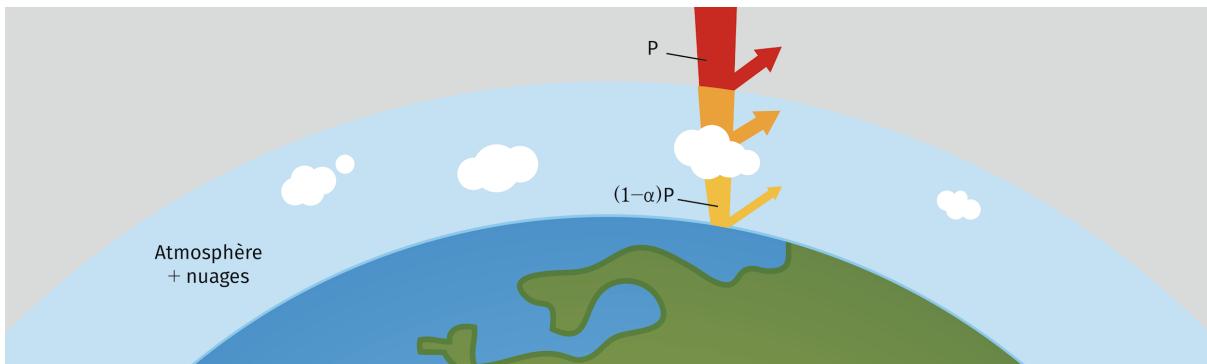
3.2. Présentation des documents

- **Document 1** : Ce document, constitué d’une photographie et d’un texte, est une contextualisation attrayante de la notion d’albédo. Par un exemple historique, il suggère les modifications qu’entraînent une modification de l’albédo, sans toutefois formuler la problématique explicitement.
- **Document 2** : Ce document vise à définir de manière assez exhaustive l’albédo.
- **Document 3** : Constitué d’un tableau et d’une photographie, ce document permet aux élèves de connaître quelques valeurs typiques d’albédo pour des surfaces terrestres classiques.



3.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 :



$$\alpha = \frac{P_r}{P_i}$$

Question 2 : L'albédo α est défini comme $\frac{P_r}{P_i}$, où P_r (respectivement P_i) désigne la puissance réfléchie (respectivement incidente). Or, l'albédo de l'atmosphère et des nuages étant égale à 0,25, on en déduit que 25% de la puissance solaire qui atteint est réfléchie avant de pénétrer dans l'atmosphère.

Question 3 : D'après la question précédente, 25% de la puissance solaire qui atteint la Terre ($1,74 \times 10^{17}$ W) ne pénètre pas dans l'atmosphère. C'est donc $1 - 0,25 = 0,75 = 75\%$ de la puissance solaire qui atteint la Terre qui va atteindre le sol terrestre.

L'application numérique donne : $0,75 \times 1,74 \times 10^{17} = 1,3 \times 10^{17}$ W donc la puissance des rayonnements solaires qui atteignent le sol terrestre vaut $1,3 \times 10^{17}$ W.

Question 4 : Les surfaces du globe réfléchissant le plus les rayons lumineux leur parvenant sont celles

ayant le rapport $\frac{P_r}{P_i}$ le plus élevé, soit l'albédo le plus élevé. D'après le document 3, cela correspond à la neige fraîche et à la glace. Les zones du globe correspondantes sont les pôles et les zones de très haute altitude (enneigées).

Question 5 : Le document 1 évoque une « augmentation de la réflexion du rayonnement solaire reçu » en 1783. On en déduit que $\frac{P_r}{P_i}$ augmente. Comme la distance de la Terre au Soleil ne varie pas, $\frac{P_r}{P_i}$

reste constant donc le rapport $\frac{P_r}{P_i}$ augmente. Le paramètre physique modifié en 1783 est l'albédo de l'atmosphère.

L'atmosphère joue donc le rôle de filtre d'une partie des rayons solaires incidents et influe donc sur le bilan thermique terrestre.

3.4. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Une lampe de bureau ;
- Un porte tube ;
- Des tubes à essai ;
- Du papier aluminium ;



- Du papier noir ;
- Du papier blanc ;
- Du ruban adhésif ;
- De l'eau ;
- Un thermomètre.

Protocole :

- Entourer les tubes à essai avec les différents papiers à disposition. Si le papier aluminium possède deux faces différentes (une face polie et une face dépolie), réaliser deux tubes différents ;
- Remplir les tubes d'eau et les placer dans le porte tube ;
- Mesurer et noter la température de chaque tube ;
- Éclairer les tubes à une quinzaine de centimètres à l'aide de la lampe. Essayer d'éclairer uniformément les tubes ;
- Attendre 5 à 10 minutes ;
- Mesurer à nouveau la température des tubes.

Résultats attendus / documents de secours :

On observe des augmentations de température différentes selon le type de surface du tube.

On observe la plus grosse augmentation de température pour le tube noir.

On observe la plus petite augmentation de température pour le tube aluminium poli.

Selon les conditions expérimentales, les augmentations de température pour les tubes blanc et aluminium poli peuvent être proche, mais toujours inférieures à celles du tube noir.



Activité 4 : Absorption d'une part du rayonnement solaire par l'atmosphère

4.1. Généralités

L'objectif est de l'activité est de montrer que la majorité des rayonnements solaires diffuse à travers l'atmosphère et seule une faible portion sera absorbée.

Le savoir faire le plus L'explication de cette raison La saisie d'informations et leur mise en relation pour répondre à un problème sont travaillées dans cette activité.

Lien au programme :

Après avoir compris qu'une fraction de la puissance solaire est réfléchie par la Terre vers l'espace (albédo), les élèves sont amenés à montrer que les propriétés des gaz qui constituent l'atmosphère permettent de comprendre qu'une partie de cette puissance solaire reçue par la Terre est absorbée par l'atmosphère.

Durée : Cette activité peut être réalisée en 30 minutes.

Autre compétence mobilisable dans cette activité :

Dans cette activité, l'élève devra bien maîtriser l'analyse de graphique pour en réaliser une étude pertinente.

4.2. Présentation des documents

Document d'appel : Le document d'appel fait le bilan de l'activité précédente et pose le problème de du devenir du rayonnement solaire incident.

- **Document 1 :** Dans ce document, les notions apprises sur la loi de Wien sont reprises ; le graphique proposé illustre le fait que le maximum d'émission du Soleil est centré sur le visible.
- **Document 2 :** Il permet de mettre en évidence les propriétés d'absorption de certains gaz de l'atmosphère pour des rayonnements de longueurs d'onde spécifiques. Cette capacité est très variable selon le gaz et selon les longueurs d'onde considérées.

4.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La puissance d'émission du Soleil est maximale (10^{14} W.m^{-3}) pour des longueurs d'onde centrées sur le visible (entre 0,4 et 0,7 μm). Dans les domaines correspondant aux UV et IR, la puissance d'émission du Soleil est moindre.

Question 2 : De 0,3 à 1 μm l'absorption des rayonnements solaires est minimale. Elle sera supérieure en dehors de cet intervalle.

Question 3 : Les rayonnements solaires, dont les longueurs d'onde sont centrées sur le visible, ne seront pas absorbés par l'atmosphère. Ainsi, la puissance solaire traverse majoritairement



l'atmosphère et atteint la surface terrestre. Seule une partie de cette puissance solaire sera absorbée par l'atmosphère.

Activité 5 : Les transferts d'énergie au sein de l'atmosphère

5.1. Généralités

En plus de la puissance solaire reçue, la Terre reçoit une puissance supplémentaire.

L'objectif de cette activité est donc d'en identifier l'origine.

Pour atteindre cet objectif, l'élève doit exploiter un ensemble de documents et doit les mettre en relation.

Lien au programme :

L'élève est amené à montrer que le sol émet un rayonnement électromagnétique dans le domaine des infrarouges dont la puissance par unité de surface augmente avec la température.

Il étudie le devenir de ce rayonnement : une partie de cette puissance est absorbée par l'atmosphère puis renvoyée vers le sol (c'est l'effet de serre).

En bilan, l'élève devra montrer que la puissance reçue par le sol en un lieu donné est égale à la somme de la puissance reçue du Soleil et de celle reçue de l'atmosphère.

Durée : L'ensemble documentaire étant conséquent et cette activité clôturant chapitre, il est important de prévoir un large moment (1 heure) consacré à la réalisation de l'activité. Cette dernière se poursuit par la réalisation du schéma bilan et la construction d'un bilan plus large sur le bilan radiatif de la Terre.

5.2. Présentation des documents

Document d'appel : Le document d'appel à pour objectif de montrer que la Terre en plus de la puissance solaire reçue reçoit une puissance supplémentaire. Le problème est donc posé de son origine.

- **Document 1 :** Le document permet l'étude de la puissance spectrale de la Terre et de la comparer à celle du Soleil.
- **Document 2 :** La carte proposée présente la puissance émise par la Terre sous forme de rayonnement infrarouge. Elle peut être mise en relation avec la puissance solaire reçue par la surface terrestre.
- **Documents 3 et 4 :** Ils permettent de définir la notion de gaz à effet de serre et de revenir sur leurs propriétés. Ces documents peuvent être mis en relation avec le document 2 de l'activité 4.
Le document 3 permet de découvrir la démarche ayant permis à John Tyndall de démontrer les propriétés de ces gaz.
- **Document 5 :** Ce document classique permet de confirmer le lien entre concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère et température moyenne de surface. Il permet également de faire le lien avec le programme de terminale.

5.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La Terre, chauffée par le Soleil, émet des rayonnements infrarouges (document 1 et 2). Les gaz à effet de serre présentent la propriété d'absorber une partie de ces rayonnements infrarouges émis et les renvoie vers la surface de la Terre (documents 3 et 4, document 2 de l'activité 4). Cette puissance supplémentaire reçue par la surface terrestre permet alors un réchauffement supplémentaire de la surface terrestre.

Question 2 : Avant 1800, les teneurs en CO₂ et la température oscillent autour de valeurs constantes (respectivement 200 ppmv et une anomalie de - 0,25°C par rapport à 1961-1990). Après 1800, la teneur CO₂ augmente de 100 ppmv en moyenne sur 200 ans ; dans un même temps, l'anomalie de température augmente de plus de 1°C.

Le lien direct entre la concentration en CO₂ et la température moyenne de surface est établi.

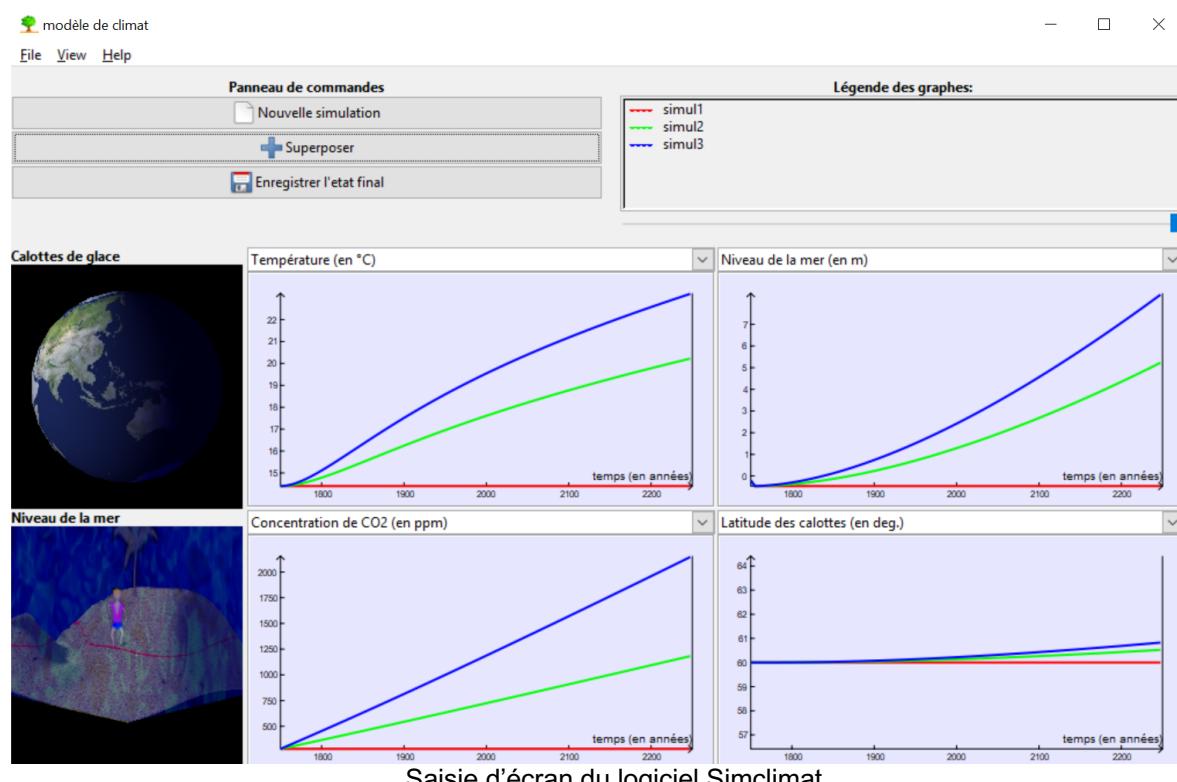
5.4. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Logiciel *Simclimat*.

Protocole :

- Proposition d'exploitation simple du logiciel *Simclimat* :



**Légende :**

- Simul 1 : l'élève fixe la teneur en CO₂, à une valeur correspondant à celle du monde en 1750 ;
- Simul 2 : l'élève fixe la teneur en CO₂ à une valeur correspondant à celle du monde en 2007 avec une émission anthropique en CO₂ identique à celle d'aujourd'hui ;
- Simul 3 : l'élève fixe la teneur en CO₂ constante à une valeur correspondant à celle du monde en 2007 avec une émission anthropique en CO₂ deux fois supérieure à celle d'aujourd'hui.

Activité numérique : Modélisation de l'effet de serre : apports et limites (activité de groupe)

6.1. Généralités

Cette activité a pour objectif de présenter une démarche d'élaboration de la modélisation de l'effet de serre.

Objectifs notionnels :

- Comprendre l'effet de serre et connaître les paramètres qui l'influencent.

Objectifs méthodologiques :

- Travailler la notion de modèle en sciences ;
- Communiquer de manière rigoureuse des résultats scientifiques.

Durée : 60 min.

6.2. Présentation des documents

6.2.1. Ensemble documentaire (page 1)

Présentation des documents :

- **Document 1** : Frise chronologique présentant des éléments importants dans l'élaboration du modèle de l'effet de serre.
- **Document 2** : Présentation de l'héliothermomètre de De Saussure, une première tentative d'expérimentation sur l'effet de serre.
- **Document 3** : Analyse par Fourier des résultats de l'expérience de De Saussure. Il explique les différents facteurs expliquant la température observée dans le dispositif :
 - Absence de circulation d'air (pas de convection avec l'air extérieur) ;
 - Transparence de la partie supérieure (possibilité de transfert par rayonnement depuis le Soleil) ;
 - Forte isolation du dispositif avec l'extérieur (conduction thermique très diminuée) ;



- Le quatrième point est plus compliqué. Fourier suppose que le verre utilisé permet de piéger les rayonnements infrarouges émis à nouveau par la boîte (en effet le verre est opaque pour une partie des rayonnements infrarouge).
- La température finale est le fruit d'un équilibre de transferts thermiques.

Suggestions de questions :

- **Document 2 et 3** : Pour aider à la compréhension du dispositif, on peut poser directement la question aux élèves de l'utilité de chacun des éléments :
 - Pourquoi une plaque de verre et pas une plaque opaque ?
 - Pourquoi une couche de liège ?
 - Pourquoi une caisse fermée hermétique (sans trous).
- **Document 3** : Pourquoi la température ne dépasse pas les 109,6 °C ? Réponse : Il n'est pas possible d'empêcher totalement les transferts énergétiques vers l'extérieur, le système atteint donc un état d'équilibre.

6.2.2. Ensemble documentaire (page 2)

Présentation des documents :

- **Document 4** : Critiques du professeur Wood des conclusions de Fourier.
 - Le professeur Wood estime que le choix du verre dans le dispositif de Saussure n'a en fait que peu d'effet hormis celui d'empêcher la circulation d'air. Il montrera que la contribution des rayonnements infrarouges piégés est très faible ;
 - Attention ! Cet article est régulièrement utilisé par les climatosceptiques pour réfuter l'existence de l'effet de serre. Dans les faits, celui-ci n'est qu'une critique du modèle créé par De Saussure et ses conclusions ne peuvent être extrapolées à l'atmosphère directement ;
- **Document 5** : Expérience à réaliser en classe pour conclure sur l'influence du CO₂ sur l'effet de serre. On constate dans les deux situations que le CO₂ a un effet amplificateur sur le réchauffement.

Ressources complémentaires :

- Pour discuter de l'article de Wood : <https://www.agoravox.fr/actualites/environnement/article/l-effet-de-serre-a-l-aune-de-l-86961>

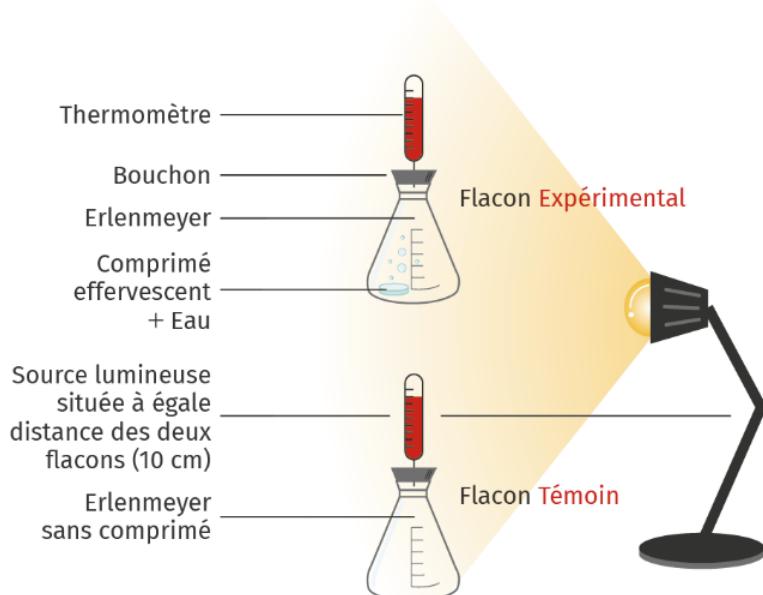
6.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

● Groupe 1 : Analyse critique du modèle de De Saussure

- 1. Fourier réalise l'analyse suivante de l'expérience de De Saussure :
 - En recevant du rayonnement solaire, la boîte chauffe et de part sa température émet à son tour un rayonnement ;
 - Le rayonnement solaire traverse majoritairement le verre alors que le rayonnement émis par la boîte ne le traverse pas ;



- Le reste du dispositif est là pour limiter les transferts d'énergie vers l'extérieur : isolation par le liège, boîte fermée hermétiquement pour éviter la circulation d'air.
 - 2. Le rayonnement émis par la boîte est majoritairement un rayonnement infrarouge. Le professeur Wood veut voir l'influence de ces rayonnements sur la température du système à l'équilibre. Pour cela il reproduit l'expérience de De Saussure en changeant un paramètre : il utilise soit une vitre en verre (qui bloque les rayonnements infrarouge) ou une vitre en halite (qui laisse passer les rayonnements infrarouges).
 - 3. Les résultats de Wood nuancent l'importance de l'effet de serre sur la température à l'équilibre de la boîte, ils permettent donc de critiquer l'expérience de De Saussure.
- Groupe 2 : Analyse critique du modèle « en classe »
 - 1.



- Le modèle en classe a pour objectif de déterminer si la présence de CO₂ a une influence sur le réchauffement du milieu ou non. ;
 - Le paramètre, sur lequel on influe, est la présence ou non de CO₂ dans le milieu ;
 - Le paramètre mesuré est la température dans l'rlenmeye.
2. On constate que la présence de CO₂ accentue le réchauffement du milieu, particulièrement lorsque la lampe émet dans l'infrarouge. Ce paramètre n'a pas été pris en compte par Wood dans son analyse.



6.4. Protocole et résultats expérimentaux

Matériel :

- Deux erlenmeyers avec bouchon troué (pour le thermomètre)
- Une lampe à incandescence
- De l'eau
- Deux thermomètres
- Un comprimé effervescent

Protocole :

- Mettre la même quantité d'eau dans les deux erlenmeyers (une dizaine de millilitres) ;
- Placer les erlenmeyers devant la lampe ;
- Introduire le comprimé effervescent dans un erlenmeyer et boucher les deux erlenmeyers.
ATTENTION : pendant la durée de l'effervescence, s'assurer qu'il y ait une petite circulation d'air pour éviter une surpression qui ferait sauter le bouchon et risquerait la casse du thermomètre ;
- Observer et noter l'évolution de la température.

Exercices

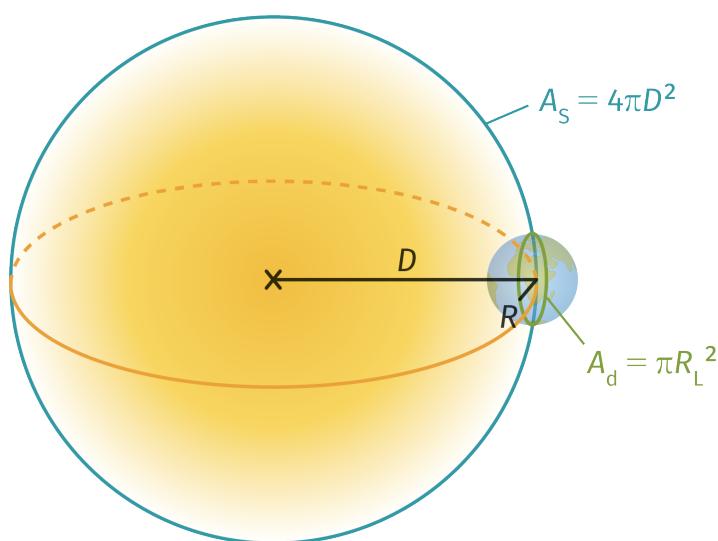
7.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Puissance solaire interceptée par la Lune

Compétence principalement travaillée : Calculer la proportion de la puissance émise par le Soleil qui atteint la Terre.

Correction :

1.



La Lune est située à une distance D du Soleil. À cette distance, la puissance solaire se répartit sur une sphère de rayon D , dont la surface vaut $4\pi \cdot D^2$. De toute la puissance répartie sur cette sphère, la Lune en intercepte une portion, sur une surface égale à $\pi \cdot R_L^2$. La Lune intercepte donc une portion ε

$$\varepsilon = \frac{\pi \cdot R_L^2}{4\pi \cdot D^2} = \left(\frac{R_L}{2D}\right)^2$$

de la puissance émise par le Soleil égale à :

$$\varepsilon = \left(\frac{1737}{149,6 \times 10^6}\right)^2 = 1,348 \times 10^{-10}$$

2. Application numérique :

La valeur obtenue est inférieure à celle calculée précédemment pour la Terre (environ 5×10^{-10}). Cela est attendu puisque la Lune et la Terre sont en moyenne situées à la même distance du Soleil donc le seul paramètre qui change est le rayon, qui est inférieur dans le cas de la Lune. Toutefois, l'ordre de grandeur des deux valeurs calculées est le même.



Exercice 2 : La température du sol lunaire

Compétence principalement travaillée : Calculer la proportion de la puissance émise par le Soleil qui atteint la Terre.

Correction :

1. L'albédo du sol lunaire est trois fois plus faible que celui de la Terre. Il absorbe donc une plus grande proportion du rayonnement qu'il reçoit.

2. La Lune ne possède pas d'atmosphère, il n'y a donc pas d'effet de serre. La température à la surface de la Lune est donc due uniquement aux rayonnements solaires reçus.

Le jour, l'absence de réflexion des rayonnements couplée au fait que l'albédo lunaire est plus important que l'albédo terrestre explique la plus grande température en surface.

La nuit, sans atmosphère, le sol lunaire ne reçoit pas de rayonnement (pas d'effet de serre et pas de rayonnement solaire) ce qui explique la faible température lunaire.

La température beaucoup plus faible est le résultat de l'absence d'effet de serre sur la Lune.

Exercice 3 : Influence de l'humidité de l'atmosphère sur le bilan radiatif terrestre

Compétence principalement travaillée : Mise en relation de données saisies pour répondre à un problème.

Correction :

Au niveau de l'équateur, l'humidité relative est maximale à 1 UA et le rayonnement infrarouge moyen sortant est minimal à 160 UA.

À une latitude de 30° Nord, l'humidité relative est nulle, le rayonnement infrarouge moyen sortant est maximal à 320 UA.

Ces données permettent donc de vérifier que la vapeur d'eau, gaz à effet de serre, présente la capacité d'absorber les rayonnements infrarouges.

Sa présence dans l'atmosphère conditionne donc directement la quantité de rayonnements infrarouges, émis par la Terre, sortant de l'atmosphère et donc de là le bilan radiatif.

7.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : L'éclipse totale de Soleil de 1999

Compétence principalement travaillée : Exploiter des informations extraites des données.

Correction :

1. Le centre de la tâche d'ombre étant situé à Reims, celle-ci a décrit l'intégralité du diamètre au cours du déplacement de la tâche. Celui-ci ayant une longueur $D = 112 \text{ km}$ et la tâche s'étant déplacée à une vitesse $v = 3055 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, Reims s'est retrouvée plongée dans l'obscurité pendant une durée $\Delta t = \frac{D}{v}$. L'application numérique donne : $\Delta t = \frac{112}{3055} = 3,67 \times 10^{-2} \text{ h} = 2,20 \text{ min} = 2 \text{ min } 12 \text{ s}$.



2. De toute la puissance émise par le Soleil, la Terre en intercepte une portion, sur une surface S égale à $\pi \cdot R_T^2$. L'application numérique donne : $S = \pi \times 6371^2 = 1,275 \times 10^8 \text{ km}^2$.

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \pi \cdot \frac{D^2}{4}$$

3. L'aire de la tâche d'ombre est donnée par

$$\text{donne : } A = \pi \times \frac{112^2}{4} = 9,85 \times 10^3 \text{ km}^2.$$

4. La puissance solaire interceptée par la Terre se répartissant de manière uniforme sur toute la surface

$$S, \text{ le rapport } \frac{P_{\text{ombre}}}{P} \text{ (avec } P = 1,74 \times 10^{17} \text{ W) est égal au rapport } \frac{A}{S}. \\ \text{Ainsi, } P_{\text{ombre}} = P \cdot \frac{A}{S}, \text{ soit } P_{\text{ombre}} = 1,74 \times 10^{17} \times \frac{9,85 \times 10^3}{1,275 \times 10^8} = 1,34 \times 10^{13} \text{ W.}$$

5. Pendant toute la durée où Reims s'est trouvée plongée dans l'obscurité, la Terre n'a pas pu intercepter, à cause de la tâche d'ombre, une énergie E_{ombre} égale à $P_{\text{ombre}} \cdot \Delta t$. L'application numérique donne $E_{\text{oombre}} = 1,34 \times 10^{13} \times 10^{-3} \times 3,67 \times 10^{-2} = 4,92 \times 10^8 \text{ kWh}$.

6. En convertissant la valeur donnée dans l'énoncé en kWh, on obtient $4 \times 10^8 \text{ kWh}$. Ainsi, il faudrait un peu plus d'un an (environ 1 an et 3 mois) aux Rémois pour consommer autant d'énergie que la valeur calculée à la question précédente.

Exercice 5 : C'est une maison... blanche !

Compétence principalement travaillée : Exploiter des informations extraites des données.

Correction :

Le climat méditerranéen est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. En été, les températures sont souvent supérieures à 30 °C.

Néanmoins, la couleur blanche des maisons permet de localement augmenter l'albédo des zones résidentielles. Celui-ci est alors proche de 0,9 (valeur de l'albédo de la neige fraîche). Ainsi, lorsque le rayonnement solaire frappe les murs des maisons, celui-ci est pour son immense partie réfléchi vers l'atmosphère. Cela évite une élévation locale de la température au voisinage des murs, ce qui permet que la température des rues ne soit pas trop élevée.

Exercice 6 : La Température de Vénus

Compétence principalement travaillée : Mise en relation de données saisies pour répondre à un problème.

Correction :

Si l'on tient compte uniquement de la distance au Soleil, la température moyenne de surface de Vénus devrait être de -42°C. Or cette planète est entourée d'une atmosphère essentiellement composée de CO₂, gaz à effet de serre présentant la capacité d'absorber les rayonnements infrarouges.

Le spectre d'émission de Vénus présente un maximum d'émission autour de 4 μm. A cette longueur d'onde, le dioxyde de carbone présente une capacité d'absorption maximale.

Le dioxyde de carbone de l'atmosphère de Vénus absorbe donc une grande partie des rayonnements infrarouges émis par Vénus et les renvoie vers la surface. Il s'en suit un effet de serre responsable de



l'augmentation de la température moyenne de surface.

Exercice 7 : Un panneau solaire hors du commun

ERRATUM : les couleurs du spectre du doc. 1 sont inversées.

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation des informations extraites des données et ses connaissances.

Correction :

Si l'on applique la loi de Wien au système d'émission : $\lambda_{\text{max}} = (2,9 \times 10^{-3}) / 270$ soit $\lambda_{\text{max}} = 11 \mu\text{m}$. D'après le document 1, les rayonnements de cette longueur d'onde sont très peu absorbés par l'atmosphère. Ils vont donc pouvoir la traverser et aller dans l'espace. Le panneau solaire n'est donc pas soumis à l'effet de serre et se refroidit sans réchauffer l'atmosphère environnant. Le refroidissement est alors plus efficace que pour un panneau solaire qui rayonne dans toutes les longueurs d'onde de l'infrarouge et réchauffe l'atmosphère environnant.

7.3. Le coin des experts

Exercice 8 : Un des problèmes posés par la fonte des glaces

Compétence principalement travaillée : Déterminer la puissance reçue par le sol à partir de l'albédo.

Correction :

De manière générale, on peut distinguer deux éléments qui contribuent à la réflexion du rayonnement solaire : l'atmosphère et les surfaces terrestres. Dans cet exercice, nous ne traiterons que le cas de l'albédo des surfaces terrestres, considérant que l'albédo de l'atmosphère est constant. Les surfaces concernées par la fonte des glaces sont des surfaces à fort albédo, compris entre 0,6 et 0,9. Lorsqu'elles disparaissent, ces surfaces à fort albédo laissent place à l'eau liquide (exemple des icebergs aux pôles) ou à des sols sombres (exemple de l'image : la Mer de Glace des Alpes), qui sont des surfaces à faible albédo, inférieurs à 0,2. Ainsi, l'albédo moyen des surfaces terrestres diminue lentement au cours du temps. Or, l'albédo terrestre est défini comme le rapport de la puissance réfléchie par la Terre par la puissance reçue par la Terre. Ainsi, la Terre réfléchit de moins en moins de puissance solaire (elle en absorbe de plus en plus) : la température de la Terre tend donc à augmenter. La fonte des glaces est donc un facteur aggravant du réchauffement climatique. On peut également parler de rétroaction positive de l'albédo : moins il y a de glace, moins l'albédo terrestre est élevé, plus l'énergie est absorbée par la Terre et donc, plus les glaces fondent. De nombreuses rétroactions sont identifiables en climatologie :

- Rétroaction positive : vapeur d'eau, couverture nuageuse, etc. ;
- Rétroaction négative : nuages bas.

Source : Rétroaction, <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-retroaction-13071/>.



Exercice 9 : Orbite elliptique et climat

Compétence principalement travaillée : Déterminer la puissance reçue par le sol à partir de l'albédo.

Correction :

1. On sait que la proportion de la puissance solaire émise que la Terre intercepte est inversement proportionnelle à D^2 , où D est la distance Terre-Soleil. Ainsi, la Terre intercepte une part d'autant plus importante de la puissance solaire que D est faible, c'est-à-dire qu'elle est proche du Soleil. Ainsi, le périhélie correspond au maximum de la puissance solaire reçue par la Terre.

2. D'après le document 1, $e = 0,017$ actuellement. On peut ainsi effectuer l'application numérique pour

$$\frac{r_a}{r_p} = \frac{1 + 0,017}{1 - 0,017} = 1,0$$

calculer le rapport demandé : $\frac{r_a}{r_p}$ si on respecte les chiffres significatifs. On peut néanmoins donner la décimale suivante : on obtient alors 1,03.

3. Lorsque l'excentricité atteint sa valeur maximale, l'application numérique donne :

$$\frac{r_a}{r_p} = \frac{1 + 0,058}{1 - 0,058} = 1,1$$

En utilisant la même démarche que dans la première partie du cours, on démontre que la proportion ε

du rayonnement solaire interceptée par la Terre vaut $\varepsilon = \left(\frac{R_T}{2D}\right)^2$ où R_T désigne le rayon terrestre. Ainsi, on peut définir les proportions ε_a et ε_p à l'aphélie et au périhélie. Pour déterminer le pourcentage de rayonnement solaire reçu supplémentaire au périhélie par rapport

$$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_a}{\varepsilon_a} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_a} - 1$$

à l'aphélie, on calcule la quantité $\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_a}$. On peut simplifier la fraction de gauche :

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_a} = \frac{\left(\frac{R_T}{2r_p}\right)^2}{\left(\frac{R_T}{2r_a}\right)^2} = \left(\frac{r_a}{r_p}\right)^2$$

4. Lorsque l'aphélie se trouve correspond au solstice d'hiver dans l'hémisphère Sud, cela signifie que, dans l'hémisphère Sud, la Terre est le plus éloigné du Soleil au solstice d'hiver et le plus proche du Soleil au solstice d'été.

Dans l'hémisphère Nord, la situation est alors inversée. Lorsque l'excentricité est faible (comme actuellement), on peut quasiment considérer que l'orbite est circulaire donc il n'y a pas de différence majeure entre les saisons de l'hémisphère Nord et celles de l'hémisphère Sud.

En revanche, lorsque l'excentricité est à sa valeur maximale, la Terre intercepte 26% de rayonnement supplémentaire au périhélie qu'à l'aphélie. Cela correspond au solstice d'été dans l'hémisphère Sud : les étés sont donc d'autant plus chauds et les hivers d'autant plus rigoureux. À l'inverse, dans l'hémisphère Nord, les étés comme les hivers sont plus doux.

Exercice 10 : Ozone stratosphérique et troposphérique

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation des données saisies avec ses connaissances.

**Correction :**

Le soleil émet majoritairement des rayonnements dont les longueurs d'onde correspondent aux rayonnements ultraviolets et visibles. La Terre émet des rayonnements infrarouges.

L'ozone est un gaz qui présente la capacité d'absorber des rayonnements ultraviolets et absorbe les rayonnements infrarouges d'une longueur d'onde de 10 µm.

Les rayonnements ultraviolets incidents, émis par le Soleil, sont donc absorbés par la couche d'ozone stratosphérique.

Une partie des rayonnements infrarouges émis par la Terre sont donc absorbés par la basse atmosphère.

L'effet de serre est un réchauffement de la surface terrestre lié à la présence dans la basse atmosphère de gaz absorbant les rayonnements infrarouges et les renvoyant vers la surface.

L'ozone stratosphérique ne participe donc pas à l'effet de Serre.

Exercice numérique supplémentaire :**Bientôt disponible**

Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 6 : Énergie solaire et photosynthèse

Introduction

Présentation

L'objectif principal du chapitre est de montrer comment l'utilisation par la photosynthèse d'une infime partie de l'énergie solaire reçue par la planète fournit l'énergie nécessaire à l'ensemble des êtres vivants (à l'exception de certains milieux très spécifiques non évoqués dans le programme, mais signalés dans un encadré page 106).

Ce chapitre présente aussi le stockage à long terme de cette énergie dans les combustibles fossiles, et propose de travailler sur les notions d'énergies fossiles et énergies renouvelables dans une activité de groupe ; cette notion est proposée pour la partie enjeux et débats du thème 2 du programme : « *Le discours sur l'énergie dans la société : analyse critique du vocabulaire d'usage courant (énergie fossile, énergie renouvelable, etc.).* »

Enfin, il est important de signaler qu'aucun développement sur les mécanismes cellulaires et moléculaires de la photosynthèse n'est exigible par le programme officiel, et les documents respectent cette consigne dans leur ensemble.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

- Au cycle 4 :
 - Etude des besoins des cellules d'une plante chlorophyllienne, des lieux de production ou de prélèvement de matière.
 - L'exploitation des ressources naturelles a été abordée à travers différents exemples.
- En seconde :
 - Les métabolismes autotrophe et hétérotrophe ont été étudiés à l'échelle cellulaire, en caractérisant les principaux échanges entre les organismes et le milieu : par exemple, photosynthèse, respiration, fermentation.
 - Les processus de sédimentation ont été étudiés.

Bibliographie

- *Botanique, biologie et physiologie végétale*, de Meyer S., Reeb C., Bosdeveix R., 2008, Éditions Maloine.
Un ouvrage de référence concernant la biologie végétale.





Sitographie

- Deux sites de référence sur la photosynthèse, pour se remettre à jour ou approfondir ses connaissances :
 - https://rnbio.upmc.fr/physio_veg_photosynthese_sommaire
La photosynthèse, Ressources Numériques en Biologie.
 - <https://planet-vie.ens.fr/article/1507/photosynthese-generalites>
La photosynthèse : généralités, Planet Vie - ENS.

Activité 1 : La photosynthèse, porte d'entrée de l'énergie solaire dans le monde vivant (documentaire)

1.1. Généralités

Cette première activité permet de faire la transition avec les chapitres précédents où la notion d'énergie solaire a été développée, et de quantifier quelle partie de cette énergie est utilisée par la photosynthèse à différentes échelles, de la plus petite à la plus grande : absorption par la feuille reposant sur l'absorbance des pigments chlorophylliens, puis surface d'absorption à l'échelle d'un arbre, puis production primaire terrestre et océanique à l'échelle planétaire.

Objectifs notionnels :

- À l'échelle de la planète, les végétaux verts utilisent pour la photosynthèse environ 0,1 % de la puissance solaire totale disponible ;
- À l'échelle de la feuille, la photosynthèse utilise 1 % de la puissance radiative reçue, le reste est soit diffusé, soit transmis (transparence), soit absorbé (échauffement et évapo-transpiration) ;
- Une partie du rayonnement solaire absorbé par les végétaux verts permet la synthèse de matière organique à partir d'eau, de sels minéraux et de dioxyde de carbone (photosynthèse).

Objectifs méthodologiques :

- Comparer les spectres d'absorption et d'action photosynthétique d'un végétal ;
- Représenter sur un schéma les différents échanges d'énergie au niveau d'une feuille ;
- Recenser, extraire et organiser des informations pour prendre conscience de l'importance planétaire de la photosynthèse.

Durée : Une séance de 1h (sans travaux pratiques).





1.2. Présentation des documents

- **Document 1 :**
 - Le premier graphique permet de comparer l'absorbance d'une solution de pigments chlorophylliens et l'activité photosynthétique d'une culture de chlorelles (algue verte unicellulaire). Cela met ainsi en évidence l'étroit lien entre absorption de la lumière et activité photosynthétique : la lumière absorbée permet la photosynthèse.
 - Le deuxième graphique montre le devenir de la lumière à l'échelle d'une feuille : ce qui n'est pas absorbé (courbe du haut) est transmis et réfléchi, en particulier dans les longueurs d'onde entre 500 et 600 nm. On explique ainsi la couleur verte des feuilles (lumière verte réfléchie).
- **Document 2 :** Ce schéma permet de présenter de manière simple et visuelle les phénomènes mis en évidence dans le document précédent : réflexion, transmission (en particulier du vert) et absorption de la lumière incidente au niveau d'un feuille.
Il montre aussi qu'une partie de l'énergie solaire absorbée sera perdue par évapotranspiration et sous forme de chaleur.
Au final, seul 1 % de l'énergie solaire reçue par la feuille sera utilisée pour la photosynthèse.
- **Document 3 :** Ce document permet de chiffrer l'importance de la surface foliaire captant l'énergie solaire pour deux arbres de tailles différentes.
Il peut être intéressant de le mettre en relation avec un chiffre du chapitre précédent sur la puissance radiative solaire reçue par la Terre : 240 W.m⁻² de puissance solaire en surface en moyenne.
- **Documents 4 et 5 :**
 - Le document 4 présente les résultats d'une expérience classique de mise en évidence de la production de glucides par une feuille éclairée. L'expérience est réalisable en démonstration, en éclairant la feuille avec un cache dès la semaine précédente de l'activité.
 - Il faut mettre les résultats en relation avec le document 5 rappelant l'équation bilan de la photosynthèse, afin de pouvoir expliquer l'origine du glucide mis en évidence par l'eau iodée : l'amidon coloré par l'eau iodée est formé de molécules de glucose synthétisées uniquement en présence de lumière.
- **Document 6 :** Ce document montre le résultat de la photosynthèse à l'échelle planétaire, quantifiable grâce à la production primaire (assimilable ici à la notion de productivité primaire ; la différence est que la production primaire est l'énergie qui est accumulée par la productivité primaire).
On peut ainsi montrer les quantités de matière organique produite, et donc d'énergie solaire transformée en énergie chimique lors de la photosynthèse. La biomasse produite est très importante à l'échelle planétaire, malgré la faible part d'énergie solaire utilisée (0,1 % de la puissance solaire totale disponible, valeur indiquée dans le programme).



**Ressources complémentaires :**

- <http://www.didier-pol.net/2PIG-VEG.htm>
Page du site de Didier Pol sur les expériences à faire avec des pigments : extraction, chromatographie, mesure du spectre d'absorption. Des exemples de résultats sont fournis.
- Les fabricants de matériel ExAO (Expérimentation Assistée par Ordinateur) fournissent en général des protocoles faisables avec leur matériel, comme la mesure du spectre d'action de la photosynthèse dans un bioréacteur.

1.2 Réponses attendues aux questions

1. Le document 1 montre que quelque soit la longueur d'onde, une partie de l'énergie solaire est toujours transmise ou réfléchie par la feuille. De plus, on constate dans le premier graphique que la lumière est particulièrement peu absorbée au-dessus d'une longueur d'onde de 500 nm, correspondant au vert.

Au final, seul 1 % de l'énergie solaire reçue servira à la photosynthèse.

2. Le premier graphique du document montre que le spectre d'absorption des pigments chlorophylliens totaux correspond étroitement au spectre d'action de la photosynthèse, ce qui montre que cette activité dépend des propriétés des pigments.

Le document 3 montre que ces pigments chlorophylliens contenus dans les feuilles captent l'énergie solaire sur de très grandes surfaces.

Le document 4 montre que les feuilles contenant ces pigments doivent être éclairées pour permettre la production de matière organique par photosynthèse.

3. Au sein des végétaux verts, l'énergie solaire est captée par les pigments chlorophylliens présents dans les feuilles, sur d'importantes surfaces. 1 % de cette énergie solaire captée par les feuilles va être absorbée et pourra permettre de produire de la matière organique par photosynthèse. À l'échelle planétaire, 0,1 % de la puissance solaire totale est utilisée de cette manière et permet la production de très importantes quantités de biomasse dans les océans et sur les continents.

Activité 2 : La photosynthèse, base indispensable de la nutrition des êtres vivants (documentaire)

2.1. Généralités

Cette activité volontairement courte s'appuie sur les acquis de seconde sur le métabolisme cellulaire (respiration, fermentation), afin de mettre en évidence le devenir de l'énergie issue de la photosynthèse. On montre ainsi trois aspects principaux : transferts de matière organique entre les êtres vivants des réseaux trophiques, utilisation comme source d'énergie métabolique et stockage dans les différents types de molécules organiques.

Objectifs notionnels :

- Ce processus permet, à l'échelle de la planète, l'entrée dans la biosphère de matière minérale stockant de l'énergie sous forme chimique ;
- Cette énergie est utilisée pour former certaines molécules organiques ;



- Ces molécules peuvent être transformées par respiration ou fermentation pour libérer l'énergie nécessaire au métabolisme des êtres vivants.

Objectifs méthodologiques :

- Quantifier l'énergie chimique contenue dans la biomasse ;
- Mettre en évidence des transferts de matière et d'énergie entre producteurs et consommateurs.

Durée : Une demi séance - 30 minutes-, ou plus selon le temps nécessaire pour remobiliser les acquis de seconde.

2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le schéma permet de mettre en évidence que l'énergie solaire convertie en énergie chimique sous forme de matière organique va aussi être la source primaire d'énergie de tous les êtres vivants. Ce transfert d'énergie se fait lors de l'ingestion de la matière organique par un consommateur primaire du réseau trophique et le rendement est très faible, puisque seuls 4 % de l'énergie solaire reçue par les végétaux seront transférés aux organismes herbivores. Puis seulement 10 % de l'énergie seront transmis à chaque nouveau maillon de la chaîne alimentaire. Tout le reste de l'énergie initialement présente sera perdue par le métabolisme (essentiellement sous forme de chaleur), mais aussi au niveau des déchets produits par les êtres vivants.
- **Document 2** : Ce document permet de comparer les deux principales voies métaboliques fournissant l'énergie aux organismes, en particulier au niveau de leur rendement énergétique. La notion d'ATP n'étant pas au programme, on se contente d'indiquer le maximum d'énergie chimique (en kilojoules) potentiellement libérée et directement utilisable par la cellule.
- **Document 3** : Énergie contenue dans différents types de molécules organiques. Ce document rappelle les trois grandes catégories de molécules stockant de l'énergie dans l'organisme, et met en évidence que les lipides permettent de stocker une quantité d'énergie chimique nettement supérieure aux glucides.

2.2 Réponses attendues aux questions

- **1.** L'énergie solaire captée par les végétaux permet de produire de la matière organique par photosynthèse. Une faible part de cette matière organique (4 %) est transférée aux consommateurs primaires lors de l'ingestion. Ensuite, 10 % de cette énergie sera à nouveau transférée aux êtres vivants suivants dans la chaîne alimentaire. La majorité de l'énergie est perdue au niveau du métabolisme et des déchets produits par les êtres vivants.
- **2.** La respiration en présence de dioxygène produit 1080 kJ par mole de glucose tandis que la fermentation en absence de dioxygène en produit seulement 60 kJ, c'est-à-dire 18 fois moins, mais permet la vie en milieu anaérobie (sans dioxygène).



- **3.** Les êtres vivants consomment la matière organique issue de la photosynthèse pour produire de l'énergie par respiration ou fermentation, ou bien la stockent sous forme d'autres molécules organiques, comme les lipides. Cette matière pourra ensuite être consommée par d'autres d'êtres vivants présents dans le réseau alimentaire. Une part importante de cette énergie chimique sera perdue sous forme de chaleur au cours du métabolisme, ou bien finira dans les déchets ou la matière « morte ».

Activité 3 : La photosynthèse à l'origine des combustibles fossiles (documentaire)

3.1. Généralités

Cette activité a 2 buts principaux :

- Mettre en évidence l'origine biologique des combustibles fossiles et les liens de ceux-ci avec l'énergie solaire
- Montrer que la formation des combustibles fossiles nécessite un contexte particulier et beaucoup de temps, c'est donc une énergie non renouvelable à notre échelle de temps (vie humaine).

Objectifs notionnels :

- À l'échelle des temps géologiques, une partie de la matière organique s'accumule dans les sédiments puis se transforme en donnant des combustibles fossiles : gaz, charbon, pétrole.

Objectifs méthodologiques :

- À partir de l'étude d'un combustible fossile ou d'une roche de son environnement, discuter son origine biologique.

Durée : 30 min ou une séance entière en incluant l'observation d'échantillons de combustibles fossiles : charbon, schiste houiller, pétrole...

3.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce document présente une photographie de charbon, à compléter avec un échantillon réel en classe si possible, et un fossile de ptéridophyte dans un schiste houiller au contact du charbon. La mise en relation des deux échantillons illustre la présence de végétaux dans les roches aboutissant au charbon.
- **Document 2** : Ce schéma en 3 étapes illustre de manière simplifiée les phénomènes géologiques permettant d'aboutir à la formation de charbon :
 - Formation d'une forêt près d'une étendue d'eau ;
 - Subsidence de la croûte terrestre entraînant l'enfoncement progressif de la forêt et son recouvrement relativement rapide par des sédiments ;





- Retrait de la mer et réinstallation d'une forêt qui pourra donner lieu à la formation d'une autre couche de charbon.
- **Document 3 :** Ce texte issu de l'interview d'un scientifique détaille l'aspect temporel de la formation du charbon, et les principales périodes géologiques concernées. Il démontre de manière imagée en deuxième partie que l'utilisation des énergies fossiles par les humains est extrêmement plus rapide que leur formation.

2.2 Réponses attendues aux questions

- 1. Il y a d'abord la formation d'une forêt près d'une étendue d'eau. Puis la subsidence de la croûte terrestre entraînant l'enfoncement progressif de la forêt et son recouvrement par des sédiments. La matière végétale ainsi recouverte donnera la future couche de charbon. Ensuite, le retrait de la mer et la réinstallation d'une forêt pourra donner lieu à la formation d'une autre couche de charbon.
- 2. Les combustibles fossiles comme le charbon ou le pétrole mettent des millions d'années à se former, tandis que les humains les utilisent en continu, ils les exploitent en permanence année après année. Les combustibles fossiles n'ont absolument pas le temps de se former de nouveau.
- 3. Le charbon est issu de la transformation de restes de végétaux enfouis pendant des millions d'années. Ces végétaux sont constitués de matière organique formée par photosynthèse, c'est-à-dire grâce à l'absorption d'une partie de l'énergie solaire par les végétaux verts. Ainsi, on peut considérer que le charbon est bien issu de l'énergie solaire, de manière très indirecte.

Activité 4 : Énergies fossiles et énergies renouvelables (activité de groupe)

4.1. Généralités

Le but de l'activité est de faire une comparaison entre combustibles fossiles et deux énergies renouvelables en lien avec la photosynthèse : le bois énergie et la méthanisation. On compare ici les rendements énergétiques, mais aussi les impacts environnementaux.

Objectifs notionnels :

- Le discours sur l'énergie dans la société : analyse critique du vocabulaire d'usage courant (énergie fossile, énergie renouvelable, etc.).

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Travailler en groupe
- Groupes possibles : 4 groupes de 4 élèves : 2 groupes travaillent sur le même thème. Dans chaque groupe : un secrétaire (prise de note utilisée par le rapporteur et éventuellement





évalué, un rapporteur (présente à l'oral), deux contradicteurs (un élève qui pose les questions au sein du groupe et un autre qui pose des questions à l'autre groupe travaillant sur le même thème) ;

- Présenter un travail réalisé collégialement à l'oral.

Durée : 1 séance d'une heure, incluant 30 minutes de préparation et 20 minutes de présentation orale et questions.

4.2. Présentation des documents

4.2.1. Document commun à tous les groupes

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce document présente des détails sur la formation du pétrole et du gaz, ainsi que les conditions nécessaires.
Le tableau présente des données énergétiques et liées aux émissions de CO₂ pour les 3 types de combustibles fossiles.

4.2.2. Ensemble documentaire : groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 2** : Ce document permet de comparer avec les données du bois avec celles des combustibles fossiles, mettant en évidence par exemple un rendement énergétique proche du charbon, mais avec une libération de CO₂ bien moindre.
- **Document 3** : Ce document permet de mettre en évidence deux caractéristiques importantes de l'énergie bois : l'importance du piégeage de CO₂, largement supérieur au CO₂ produit lors de la combustion, et le caractère renouvelable de l'énergie, avec 100 millions de m³ produits par an et 8 millions de m³ coupés pour faire du bois de chauffage.

Suggestions de questions :

- 1. Comparez l'énergie libérée par la combustion du bois avec celle libérée par la combustion des énergies fossiles, ainsi que la quantité de CO₂ produite lors de cette combustion.
- 2. Pourquoi peut-on affirmer que le bois est une énergie renouvelable ?
- 3. Pourquoi peut-on dire que l'impact environnemental de cette source d'énergie est globalement positif ?



4.2.3. Ensemble documentaire : groupe 2

Présentation des documents :

- **Document 4** : Ce document présente le principe de la méthanisation : produire de l'énergie grâce à des déchets organiques issus de différentes filières.
Il est à noter que le biogaz contient environ un tiers de CO₂ et l'épuration du biogaz en méthane libère donc du CO₂.

Suggestions de questions :

- 1. Comparez l'énergie contenue dans le biogaz avec celle des énergies fossiles, ainsi que la quantité de CO₂ produite lors de cette combustion.
- 2. Pourquoi peut-on affirmer que la méthanisation est une source d'énergie renouvelable ?
- 3. Quels sont les impacts environnementaux positifs et négatifs de cette source d'énergie ?

4.2.4. Ensemble documentaire : groupe 3

Bientôt disponible

4.3. Les indicateurs de réussite

- Groupe 1 :
 - *Avantages* : piège important à CO₂, donc impact environnemental positif du point de vue du bilan carbone.
Inconvénients : ressource moins pratique à utiliser et transporter qu'un gaz ou qu'un liquide.
 - Les granulés de bois ont un rendement énergétique proche du charbon, ressource renouvelable en quelques années.
- Groupe 2 :
 - *Avantages* : valorisation des déchets organiques, donc réduction des quantités de déchets produits. Nombreuses possibilités de conversions énergétiques.
Inconvénients : nécessite de nombreuses installations à proximité des sources de déchets organiques.
 - Rendement énergétique du biogaz proche du charbon, et supérieur si épuration en méthane.



Exercices

5.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Le spectre d'absorption de la chlorophylle

Compétence principalement travaillée : Comparer des spectres d'absorption.

Correction :

1. Dans le spectre d'absorption d'une solution de pigments extraits d'une feuille, on observe que la lumière a été absorbée entre 400 et 500 nm environ et entre 650 et 750 nm, ce qui correspond au bleu et au rouge. Par contre la couleur verte n'a pas été absorbée. D'après cette observation, on peut définir un pigment comme une substance colorée absorbant certaines longueurs d'onde de la lumière.
2. Les longueurs pouvant permettre la photosynthèse sont celles absorbées par les pigments de feuilles, donc entre 400 et 500 nm, et entre 650 et 750 nm.
3. Les pigments des feuilles n'absorbent pas les longueurs d'onde correspond à la couleur verte, entre 500 et 600 nm, ces longueurs sont réfléchies, la feuille apparaît donc verte.

Source(s) : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese/exp232.html>
Spectre d'absorption des pigments bruts.

Exercice 2 : L'indice foliaire d'une forêt de chênes

Compétence principalement travaillée : Analyser un graphique.

Correction :

1. Dans une chênaie, l'indice foliaire est nul jusqu'à mi-avril, puis il augmente d'avril à juillet jusqu'à atteindre environ 5,5 m² de feuille par m² de sol. Il est ensuite à peu près stable jusqu'à mi-octobre, puis diminue jusqu'à devenir nul fin novembre.
2. L'arbre produit une grande quantité de feuilles d'avril à juillet, c'est donc la période où il produit une grande quantité de matière organique constituant ces feuilles.





Exercice 3 : Les transferts d'énergie au sein d'un écosystème

Compétence principalement travaillée : Recenser, extraire et organiser des informations.

Correction :

1. 10^6 J d'énergie solaire permet la création de 10^4 J d'énergie par le producteur primaire, donc le rendement écologique est de 1 %.
2. Ensuite le rendement énergétique de chaque niveau de consommateur est de 10 % par rapport au niveau écologique précédent.
3. Sur les 1 % d'énergie absorbés par les producteurs primaires, seuls 10 % sont convertis en matière organique et ce à chaque niveau. Ainsi seulement 0.000 1 % de l'énergie solaire est absorbée par les consommateurs tertiaires. L'énergie d'origine solaire se dissipe donc le long des chaînes alimentaires, la majeure partie est perdue (sous forme de chaleur ou dans les déchets du métabolisme).

5.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : Les rendements énergétiques du pétrole et du bois

Compétence principalement travaillée : Analyser les données d'un tableau.

Correction :

1. 1 m³ de pétrole contient presque 4 fois plus d'énergie qu'un m³ de bois.
2. La formation d'un mètre cube de pétrole nécessite plus de 3 000 fois plus de matière organique que la formation d'un mètre cube de bois.
3. La source d'énergie ayant le meilleur rendement énergétique est le bois car elle permet de récupérer 17 391 kj par kg de matière organique formée par photosynthèse, tandis que le pétrole permet de récupérer environ 18 kj seulement pour la même quantité d'énergie solaire à l'origine.

Exercice 5 : La productivité primaire mondiale

Compétence principalement travaillée : Recenser, extraire et organiser des informations pour prendre conscience de l'importance planétaire de la photosynthèse.

Correction :

1. Entre juin et décembre 2016, les zones de forte production primaire ne sont pas les mêmes. En effet, en juin, la production primaire se situe essentiellement dans l'hémisphère sud et dans la zone équatoriale, tandis qu'en juin, la production est également très forte dans les latitudes nord, en Amérique et en Eurasie.





2. Ces différences de répartition s'expliquent par la variation de l'énergie solaire reçue en fonction des saisons (voir chapitre 4) : l'énergie solaire reçue est plus importante en été, donc en décembre dans l'hémisphère sud et en juin dans l'hémisphère nord.

5.3. Le coin des experts

Exercice 6 : L'expérience historique d'Engelmann

Compétence principalement travaillée : Analyser et interpréter une expérience historique.

Correction :

Les bactéries utilisées par Engelmann sont attirées par le dioxygène. Ainsi, lorsque que ces bactéries sont attirées par la spirogyre, on en déduit que le végétal produit du dioxygène, donc effectue la photosynthèse.

Le document montre bien que la spirogyre possède des chloroplastes. Elle est donc photosynthétique. Lorsque la spirogyre est à l'obscurité (b), les bactéries sont réparties uniformément, il n'y a pas de production de dioxygène et donc pas de photosynthèse. En revanche, à la lumière (c), on remarque que les bactéries sont collées à la spirogyre. On en déduit donc qu'elle produit du dioxygène attirant les bactéries. La lumière est donc indispensable à la photosynthèse.

Quand Engelmann procède à un éclairage selon différentes longueurs d'onde, on remarque que les bactéries sont attirées par la spirogyre quand celle-ci est éclairée par des longueurs d'onde correspondant au bleu et au rouge mais pas dans le vert. La spirogyre effectue donc la photosynthèse quand elle est soumise à des longueurs d'onde correspondant au bleu et au rouge.

L'expérience d'Engelmann permet donc de mettre en évidence que la photosynthèse ne se déroule qu'à la lumière et principalement dans les longueurs d'onde correspondant au rouge et au bleu.

Exercice 7 : Le gaz de schiste, un exemple de ressource non conventionnelle

Compétence principalement travaillée : Identifier les enjeux énergétiques et les risques environnementaux qui y sont liés.

Correction :

L'extraction du gaz de schiste nécessite de fracturer la roche mère riche en gaz, tandis que l'extraction du gaz conventionnel ne nécessite qu'un simple forage, souvent moins profond. Le mélange injecté pour la fracturation va souvent traverser des nappes phréatiques et risque donc de polluer l'eau localement, avec des risques de contamination aux métaux lourds par exemple. Le procédé d'extraction du gaz de schiste consomme aussi beaucoup d'eau, et risque de fragiliser le sous-sol.



5.4. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 2 : L'indice foliaire d'une forêt de chênes

Cet exercice passe du niveau apprentis, dans le manuel papier, au niveau experts dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Analyser un graphique.

Questions :

À partir de l'analyse du document mise en relation avec vos connaissances, indiquez quelle devrait être la variation annuelle de la production de matière organique des arbres de cette forêt.

Correction :

Dans une chênaie, l'indice foliaire est nul jusqu'à mi-avril, puis il augmente d'avril à juillet jusqu'à atteindre environ $5,5 \text{ m}^2$ de feuille par m^2 de sol. Il est ensuite à peu près stable jusqu'à mi-octobre, puis diminue jusqu'à devenir nul fin novembre. Cela montre que les arbres produisent une grande quantité de feuilles d'avril à juillet c'est donc la période où ils produisent une grande quantité de matière organique constituant ces feuilles.

Exercice 6 : L'expérience historique d'Engelmann

Cet exercice passe du niveau experts, dans le manuel papier, au niveau apprentis dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Analyser et interpréter un document pour résoudre un problème.

Questions :

1. Décrivez la répartition des bactéries pour les trois conditions d'éclairage.
2. Montrez que la spirogyre dégage du dioxygène.
3. Donnez les longueurs d'onde permettant à la spirogyre de produire du dioxygène.
4. En conclusion, montrez que cette expérience met en évidence certaines caractéristiques de la photosynthèse.





Correction :

- 1.** Lorsque la spirogyre est à l'obscurité (b), les bactéries sont réparties uniformément. En revanche, à la lumière (c), on remarque que les bactéries sont collées à la spirogyre. Quand Engelmann procède à un éclairage selon différentes longueurs d'onde, on remarque que les bactéries sont attirées par la spirogyre quand celle-ci est éclairée par des longueurs d'onde correspondant au bleu et au rouge mais pas dans le vert.
- 2.** Les bactéries utilisées par Engelmann sont attirées par le dioxygène. Ainsi, lorsque que ces bactéries sont attirées par la spirogyre éclairée, on en déduit que le végétal produit du dioxygène : il effectue la photosynthèse.
- 3.** Par conséquent, la spirogyre dégage du dioxygène principalement quand elle est soumise à des longueurs d'onde correspondant au bleu et au rouge.
- 4.** L'expérience d'Engelmann permet donc de mettre en évidence que la photosynthèse dégage du dioxygène, qu'elle ne se déroule qu'à la lumière et principalement dans les longueurs d'onde correspondant au rouge et au bleu.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 7 : Le bilan thermique du corps humain

Introduction

Présentation

L'objectif de ce chapitre est de comprendre que le corps humain est un espace d'échanges thermiques.

Le choix a été fait de commencer par la description des quatre types de perte d'énergie thermique par le corps (conduction, convection, évaporation, rayonnement), pour ensuite développer la nécessité d'une compensation de cette thermolyse par une thermogenèse, pour que le flux total d'énergie entre le corps et son milieu soit nul, condition sans laquelle la température corporelle ne pourrait être constante.

L'énergie, chez un organisme hétérotrophe comme l'Homme, doit être apportée par les nutriments, qui lorsqu'ils sont oxydés par la respiration cellulaire, permettent de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement des différents organes mais aussi à la production de chaleur. Cette seconde partie semble intéressante à développer dans une perspective d'éducation à la santé, car elle permet d'aborder avec des exemples concrets la notion de balance énergétique, et permet de faire correspondre des valeurs d'énergie dépensée lors d'activités variées et les valeurs nutritionnelles de différents aliments.

La dernière activité a été choisie volontairement comme à la limite du programme, mais permettant aux élèves de comprendre mieux la notion d'échanges thermiques par la compréhension des réactions physiologiques et comportementales permettant de réguler la température corporelle. Elle illustre les notions de flux thermiques positif et négatif.

Ce qui est enseigné au cycle 4

Dans le programme :

- Les notions de conservation et de conversion d'énergie, déjà connues, sont remobilisées ;
- La respiration et le rôle énergétique des aliments, déjà connus, sont remobilisés.

Les différentes formes d'énergie, les transferts d'énergie et la notion de puissance ont été vues en physique-chimie au collège.

Le métabolisme des cellules, dont la respiration cellulaire, est vu en classe de seconde.



Sitographie

- La ressource numérique proposée est une vidéo qui présente la découverte de la formule chimique de l'oxydation (combustion et respiration) par Lavoisier.
<https://www.youtube.com/watch?v=k8ObmQLyheg>
- Informations nutritionnelles sur une grande variété de produits alimentaires :
 - Open Food Facts - France : <https://fr.openfoodfacts.org/>
 - Ciqual, table de composition nutritionnelle des aliments : <https://ciqual.anses.fr/>
- Animation sur la régulation de la température au niveau de la peau (équivalent du document 1), Larousse encyclopédie :
https://www.larousse.fr/encyclopedie/animations/R%C3%A9gulation_thermique/1100417
- Vidéo sur la thermorégulation par les vaisseaux sanguins (Vasodilation / vasoconstriction) :
<https://www.youtube.com/watch?v=jGLmyZVk7GM>
- C'est pas sorcier, *Resister au froid*, 2013,
<https://www.youtube.com/watch?v=Ibj9VOcp06I>

En complément :

Faire travailler les élèves sur une quantification de leur apport énergétique journalier sur la base des aliments consommés en 1 journée ou bien du menu de la cantine du lycée.
Partir des théories historiques de la chaleur (cf « Perspectives » page 126).

Activité 1 : Des échanges thermiques entre le corps humain et son milieu (documentaire)

1.1. Généralités

L'objectif de cette activité est d'expliquer comment la température du corps humain peut rester constante dans un milieu dont la température n'est pas forcément égale à 37 °C.

Il semble nécessaire, en début de séance, d'insister avec les élèves sur le paradoxe entre l'homéothermie des Mammifères (et donc de l'Homme) et les variations de la température du milieu extérieur, en insistant sur le fait qu'un être vivant répond aux mêmes lois thermiques qu'un objet inanimé, et que sa température aura tendance à tendre vers celle du milieu extérieur, du fait de flux thermiques.

Ainsi, l'activité documentaire débute par la différenciation des 4 types d'échanges thermiques réalisés entre l'organisme et le milieu extérieur (documents 1 à 4), puis introduit les notions de flux thermique global, de thermolyse et de thermogénèse (documents 5 et 8).

Le principe de la calorimétrie directe (document 6) permet de comprendre la façon dont on peut mesurer ces échanges thermiques et les notions de noyau et enveloppe thermiques sont présentées (document 7).

Objectifs notionnels :

- La température du corps est stable. Cette stabilité résulte d'un ensemble de flux ;
- La température du corps reste stable parce que l'énergie qu'il libère est compensée par l'énergie dégagée par la respiration cellulaire ou les fermentations.
Globalement, la puissance thermique libérée par un corps humain dans les conditions de vie courante, au repos, est de l'ordre de 100 W.

Objectifs méthodologiques :

- Représenter sur un schéma qualitatif les différents échanges d'énergie entre l'organisme et le milieu extérieur.

Durée : 30 minutes.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.

1.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Documents 1 à 3 :** Ces documents présentent trois types d'échanges thermiques directement reliés à la différence de température entre la peau et la température extérieure : rayonnement, convection et conduction, ainsi que leur part respective dans la thermolyse totale du corps. Grâce à la formule, on peut noter l'importance d'un paramètre physique dépendant du milieu en contact et/ou de la peau, respectivement le coefficient de rayonnement, le coefficient de convection et la conductance thermique.
On peut également noter dans la formule que les vêtements interviennent sous forme d'un facteur qui réduit les échanges par rayonnement et par convection, assurant ainsi un flux thermique plus faible par rapport à une peau nue (dans la majorité des cas). Pour les échanges par conduction, une couche de vêtements peut aussi faire diminuer la conductance thermique totale du système peau + vêtement et donc réduire la thermolyse par conduction.
- **Document 4 :** Ce document présente le quatrième type d'échanges thermique, l'évaporation, qui a la particularité de ne pas dépendre de la différence de température entre le corps et le milieu, mais de la différence entre la pression de vapeur d'eau extérieure et la pression de vapeur saturante de la peau. Ceci a pour conséquence que l'évaporation est le seul mécanisme de thermolyse à pouvoir fonctionner lorsque la température du milieu extérieur est supérieure à la température du corps (à lier à la transpiration).
On note comme pour les 3 documents précédents le rôle de vêtements permettant de réduire ces pertes de chaleur par évaporation.
- **Document 5 :** Ce document introduit la notion de flux thermique global qui doit être nul dans un corps à l'équilibre thermique.
On note que la somme des 4 flux thermiques vus dans les documents précédents correspondent à la thermolyse, qui doit être exactement compensée par la production de chaleur (thermogenèse) liée majoritairement chez l'Homme à la dépense d'énergie métabolique.



- **Document 6 :** Ce document explique le principe d'une mesure par calorimétrie directe, en chambre calorimétrique, qui illustre une utilisation technique des transferts d'énergie thermique qui permet de mesurer via un paramètre mesurable (la température de l'eau) une quantité d'énergie transférée.
Cela permet aussi de comprendre à l'aide d'un exemple la signification d'une calorie : l'énergie nécessaire pour produire une augmentation de température de 1°C pour 1 litre d'eau.
Cela permet d'introduire la valeur moyenne de la puissance thermique libérée par une personne au repos : 100 W.
- **Document 7 :** Ce document illustre les notions de noyau et enveloppe thermiques à l'aide d'une imagerie infrarouge (thermogramme) et de leurs correspondances respectives avec la thermogénèse et la thermolyse, ainsi que le rôle de la circulation sanguine pour les échanges entre ces deux zones du corps. Ceci est en lien avec l'activité 3 sur les adaptations au chaud et au froid.
- **Document 8 :** Dans ce document, la thermogénèse est reliée au faible rendement énergétique du métabolisme, avec une perte importante d'énergie sous forme de chaleur, notamment dans les cellules musculaires lors des contractions.

Ressources complémentaires :

Il pourrait être intéressant de comparer un homéotherme et un ectotherme en termes de consommation d'énergie et de flux thermique (et au final de rendement énergétique).

Éventuellement à lier à la productivité de l'élevage de reptiles pour l'alimentation pour les classes de très bon niveau.

1.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Les paramètres du milieu qui influent sur les échanges thermiques entre le corps et son environnement sont la température extérieure, pour le rayonnement, la convection et la conduction, ainsi que la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant, pour l'évaporation.

NB : L'état de la matière peut aussi jouer, notamment sur les échanges par conduction, les liquides ayant une conductance thermique plus importante que les gaz.

Les pertes par évaporation ne dépendent pas de la différence de température entre la peau et l'air ambiant, mais de la différence entre la pression de vapeur d'eau de l'air et la pression de vapeur saturante de la peau. Ainsi, seul ce mode de transfert d'énergie permet la thermolyse lorsque la température extérieure est supérieure à la température corporelle.

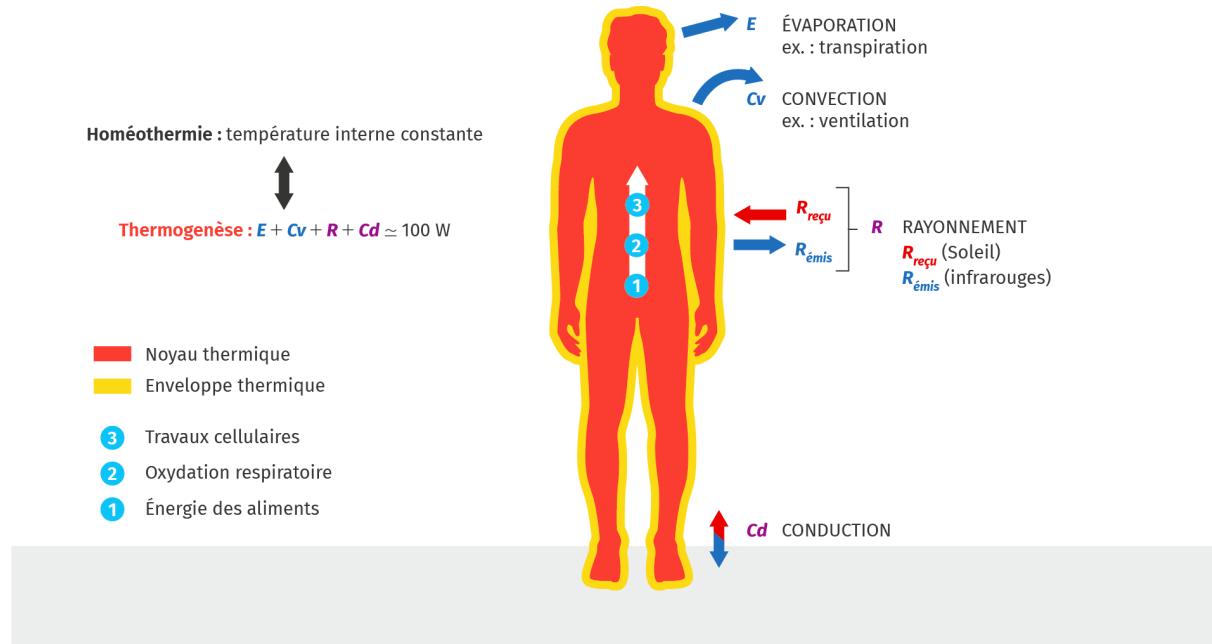
Question 2 : Si la température corporelle ne varie pas, c'est que le flux thermique global est nul (document 5). Ainsi, les pertes par thermolyse (conduction, convection, rayonnement et évaporation) mesurées par la calorimétrie directe sont égales à la production de chaleur par le métabolisme des cellules du corps, c'est-à-dire la thermogénèse.

Les 100 W de puissance thermique libérés par une personne moyenne au repos impliquent donc que 100 W de puissance sont produits par thermogénèse (la température du corps étant constante).

Question 3 : Au repos, la thermogénèse a lieu principalement au niveau du noyau thermique (système nerveux, viscères et muscles). Les cellules qui réalisent leur fonction dans l'organisme vont avoir un métabolisme qui va produire de la chaleur, qui correspondent pour la plupart des cellules à une perte d'énergie, notamment pour les cellules musculaires.

NB : Certaines cellules ont une fonction de thermogénèse, les adipocytes bruns (exercice 7).

Question 4 : Schéma bilan, *Les échanges thermiques entre le corps humain et son milieu*, p. 121 :



1.4. Ajouts libres

- **Quelques valeurs de paramètres** intervenant dans les 4 types de flux thermiques pour le corps humain, pour éventuellement faire des calculs à partir des formules données dans les documents 1 à 4 :

$$h_r = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$h_c = 4 \text{ à } 13 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ (suivant la vitesse du vent)}$$

$$k = 0,03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ dans l'air et } k = 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ dans l'eau}$$

$$h_e = 67 \text{ à } 217 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \text{ (suivant la vitesse du vent)}$$

- **Question 1 version experts :**

- 1. Doc. 1 à 4 : Dans le cas d'une température extérieure supérieure à 37°C, la part de l'évaporation dans la thermolyse est proche de 100%. Justifiez ce fait à partir des formules des différents modes de thermolyse.
- Réponse : D'après la formule, l'évaporation est le seul mode de thermolyse qui ne dépend pas de la différence de température entre le milieu et le corps, mais de la différence entre la pression de vapeur d'eau dans le milieu et la pression de vapeur saturante de la peau. Ainsi, dans le cas d'une température extérieure supérieure à 37°C, les flux de chaleur par conduction, convection et rayonnement vont correspondre à un apport de chaleur vers le corps, et donc à la thermolyse. Ainsi, dans ces conditions, seule l'évaporation va pouvoir permettre la thermolyse, d'où les 100%.

Activité 2 : L'origine de l'énergie métabolique : l'alimentation (documentaire)

2.1. Généralités

Le but de l'activité est de faire le lien entre l'énergie libérée par thermogenèse, la dépense énergétique, les apports alimentaires et la consommation de dioxygène.

La notion de balance énergétique est introduite dans une optique d'éducation à la santé.

Objectifs notionnels :

- ... l'énergie qu'il libère est compensée par l'énergie dégagée par la respiration cellulaire ou les fermentations ;
- Globalement, la puissance thermique libérée par un corps humain dans les conditions de vie courante, au repos, est de l'ordre de 100 W.

Objectifs méthodologiques :

- Utiliser des données quantitatives sur l'apport énergétique d'aliments dans un bilan d'énergie correspondant à des activités variées.

Durée : 30 minutes

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Fonder ses choix de comportement responsable vis-à-vis de sa santé en prenant en compte des arguments scientifiques.

2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce document rappelle les notions vues en seconde de respiration cellulaire et introduit la notion de coefficient thermique du dioxygène.
- **Document 2** : Ce document est en lien avec le document 6 de l'activité 1 qui présentait la calorimétrie directe, car celui-ci présente une méthode de mesure de la dépense énergétique plus pratique pour mesurer une dépense énergétique : la calorimétrie indirecte. En mesurant le volume d'O₂ consommé et en utilisant le coefficient thermique du dioxygène, on peut connaître l'énergie dépensée lors de différentes activités.
- **Document 3** : Ce document introduit la notion de métabolisme de base, et donne sa valeur moyenne au repos : 1 400 kcal / jour.
- **Document 4** : Les valeurs de puissance supplémentaires (en W) sont données pour diverses activités, et permettent de comprendre que le calcul de la dépense énergétique d'une personne correspond à l'ajout au métabolisme de base de cette puissance multipliée par le temps d'activité (d'après la formule E = P x t).
- **Document 5** : Ce document présente des valeurs nutritionnelles de trois produits courants, tels qu'on les retrouve sur les emballages industriels.

Document sous licence libre Creative Commons





- **Document 6** : Ce document introduit la notion de balance énergétique par un exemple de balance déséquilibrée.
- **Document 7** : Ce document est extrait de la norme européenne pour les apports de référence. C'est par rapport à ce tableau que sont calculés les pourcentages par rapport aux apports journaliers de référence (AJR).

Ressources complémentaires :

- Ressource équivalente au document 1, *Validation du calcul de la dépense énergétique* :
<https://www.youtube.com/watch?v=VepVUPfoSH8>
- Vidéo qui présente la découverte de la formule chimique de l'oxydation (combustion et respiration) par Lavoisier :
<https://www.youtube.com/watch?v=k8ObmQLyheg>
- Informations nutritionnelles sur une grande variété de produits alimentaires :
 - Open Food Facts - France : <https://fr.openfoodfacts.org/>
 - Ciqual, table de composition nutritionnelle des aliments : <https://ciqual.anses.fr/>

2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : La calorie indirecte consiste mesurer la différence entre le débit d' O_2 inspiré et le débit d' O_2 expiré. On obtient ainsi le débit d' O_2 consommé, qui du fait de l'équation bilan de l'oxydation respiratoire des aliments correspond directement à la quantité d'énergie consommée par le métabolisme de toutes les cellules de l'organisme.

Question 2 : Cela correspond au métabolisme de base, c'est-à-dire 1 400 kcal par jour, pour un individu adulte moyen au repos complet.

Question 3 : La dépense énergétique est la somme du métabolisme de base et de l'énergie dépensée lors de différentes activités :

- Pour une personne qui court à 8 km/h, la puissance supplémentaire est de 500 W.
Elle a couru pendant 1h, soit 3 600 secondes, donc l'énergie dépensée est $E = P \times t = 500 \times 3600 = 1,8 \cdot 10^6$ J = 1800 kJ
1 kcal = 4,184 kJ donc $1800 \text{ kJ} = 1800 / 4,184 = 430 \text{ kcal}$
Dépense énergétique totale = $1400 + 430 = 1830 \text{ kcal}$.



- Pour une personne qui marche lentement, la puissance supplémentaire est de 216 W.
Elle a marché pendant 2h, donc l'énergie dépensée est $E = P \times t = 216 \times 2 \times 3\,600 = 1,55 \cdot 10^6$ J = 1 550 kJ
1 kcal = 4,184 kJ donc $1\,550 \text{ kJ} = 1\,550 / 4,184 = 370 \text{ kcal}$
Dépense énergétique totale = $1\,400 + 370 = 1\,770 \text{ kcal}$.

Question 4 : 100 g de spaghettis : 344 kcal

50 g de sauce bolognaise : $(50/100) \times 70 = 0,5 \times 70 = 35 \text{ kcal}$

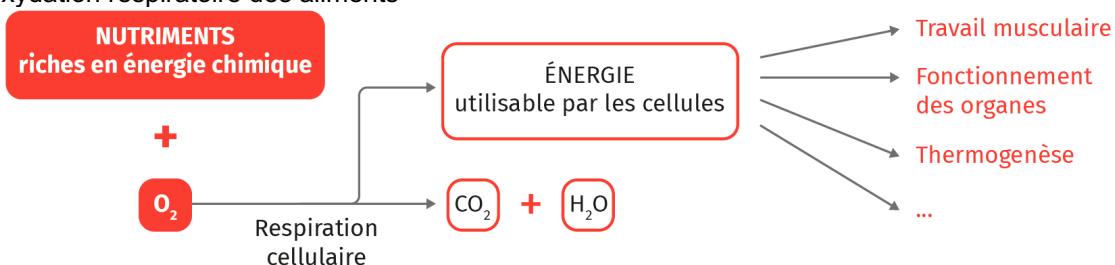
25 g d'emmental : $25 / 100 \times 1\,529 = 382 \text{ kJ} = 91 \text{ kcal}$

Le plat entier correspond donc à un apport énergétique de $344 + 35 + 91 = 470 \text{ kcal} = 1\,966 \text{ kJ}$.

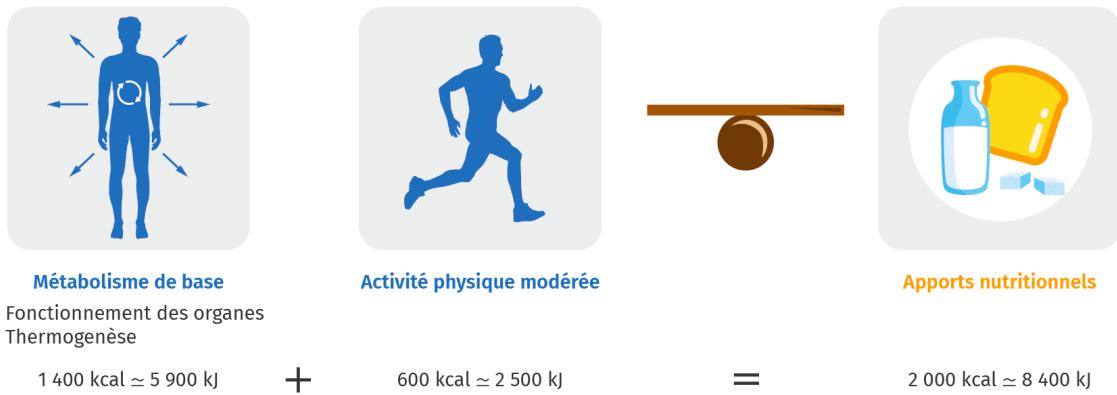
Question 5 : $E = P \times t$ donc $t = E/P$ (avec E en J, P en W et t en secondes) = $1966 \cdot 10^3 / 1\,000 = 1966 \text{ s} = 1966 / 60 = 33 \text{ minutes.}$

Question 6 : Schéma bilan, *Un appart d'énergie nécessaire : l'alimentation*, p. 121 :

L'oxydation respiratoire des aliments



La balance énergétique





Activité 3 : Les réponses de l'organisme aux environnements froids ou chauds (activité de groupe)

3.1. Généralités

Le but de cette activité est de mobiliser les connaissances acquises sur la thermogenèse et la thermolyse pour comprendre les différents mécanismes permettant de réguler sa température corporelle lors d'une hausse ou d'une baisse de la température corporelle.

Un autre objectif est de comprendre que les différentes réactions physiologiques et comportementales ne peuvent en général pas inverser le sens du flux thermique, mais seulement en faire varier la valeur en jouant sur les coefficients et facteurs de réduction dus aux vêtements. Un travail sur le lien entre les formules des quatre modes de transferts d'énergie thermique et leur signification réelle peut être intéressant.

Il pourrait aussi être intéressant d'interroger les élèves sur leur vécu, en particulier de décrire leurs propres réactions physiologiques et leurs comportements face au chaud et au froid, et de leur demander en fin d'activité d'expliquer scientifiquement l'effet de ces différentes réactions en termes de flux thermiques, et de paramètres modifiés dans les formules des quatre types de flux thermiques vus précédemment.

Objectifs notionnels :

- La température du corps est stable. Cette stabilité résulte d'un ensemble de flux ;
- Même si les réactions au froid et au chaud ne sont pas explicitement indiquées dans le programme, elles permettent de mobiliser les notions vues dans le cours et les activités autour d'un cas concret.

Objectifs méthodologiques :

- Travailler en groupe ;
- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique ;
- Savoir distinguer, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.

Durée : 30 minutes.

3.2. Présentation des documents

Document commun aux deux groupes : Schéma de la peau avec différents organes en lien avec la thermorégulation :

- Thermorécepteurs + nerf sensitif ⇒ détection des variations de température ;
- Poil et muscle érecteur du poil ⇒ « chair de poule » ;
- Adipocytes ⇒ isolant thermique ;
- Vaisseaux sanguins ⇒ relation entre enveloppe et noyau thermique ;
- Glande sudoripare ⇒ transpiration.



Ce document sert à focaliser l'attention des élèves des deux groupes sur l'importance de la peau dans la thermorégulation. Cet organe est en effet directement à l'interface entre l'intérieur du corps (noyau thermique) et le milieu extérieur, et on parle donc d'enveloppe thermique (activité 1 doc. 7).

Ensemble documentaire Groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 2** : Schéma de vasodilatation (dilatation des vaisseaux sanguins) et de sa conséquence : l'augmentation des pertes de chaleur.
La manifestation visible à l'échelle macroscopique est le rougissement de la peau.
C'est un exemple de réaction physiologique (non consciente).
- **Document 3** : Ce document explique la formation de la sueur et sa conséquence sur la température de la peau. Ce document est en lien avec le document 4 de l'activité 1.

Remarque : tous les mécanismes de thermolyse basés sur l'évaporation dépendent de la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant. Ils constituent donc le seul mécanisme de thermolyse efficace lorsque la température extérieure est supérieure à la température du corps. En revanche, ces mécanismes ne fonctionnent pas efficacement lorsque la pression de vapeur d'eau dans l'air ambiant (= humidité de l'air) est trop importante.

- **Document 4** : Ce document présente différentes réactions comportementales à une hausse de la température :
 - Se dévêtement va avoir pour conséquences d'augmenter les pertes de chaleur par convection et évaporation majoritairement. Le coefficient lié aux vêtements vu dans les documents 1 à 4 de l'activité 1 va être augmenté et le flux d'énergie thermique va être plus important.
 - Se couvrir de tissus clairs va limiter l'apport d'énergie par les radiations solaires. La lumière, dont les rayonnements infrarouges, sera moins absorbée par les vêtements et donc le corps aura un flux thermique entrant moins important.
 - S'humidifier la peau va avoir le même effet que dans le cas d'une transpiration. L'évaporation, phénomène endothermique, va faire diminuer la température corporelle.
 - S'exposer à un courant d'air va augmenter les phénomènes de convection, mais aussi d'évaporation car l'air au contact de la peau étant renouvelé très rapidement, sa pression de vapeur d'eau n'augmente pas de manière significative, garantissant des transferts d'énergie thermique plus importants.

Suggestions de questions :

- 1. Décrivez les principales réactions physiologiques en réponse à une hausse de la température. En quoi diffèrent-elles des réactions comportementales ?
- 2. Expliquez les conséquences des différentes réactions physiologiques sur le bilan thermique global du corps lors d'une hausse de la température.
- 3. Quel organe du corps humain semble avoir un rôle prédominant dans ces deux types de réactions ?
- 4. Expliquez les conséquences des différentes réactions comportementales sur les pertes thermiques par rayonnement, convection, conduction et évaporation.

Ressource complémentaire :

- Animation sur la régulation de la température au niveau de la peau (équivalent du document 1) :
https://www.larousse.fr/encyclopedie/animations/R%C3%A9gulation_thermique/1100417

Ensemble documentaire Groupe 2**Présentation des documents :**

- **Document 5** : Ce document présente la réaction physiologique de la « chair de poule » qui permet chez les mammifères à fourrure de former une couche isolante plus importante, qui limite ainsi les transferts thermiques par conduction mais surtout par convection.
Ce document permet de faire un lien avec les mécanismes de l'évolution vus en seconde, et permet d'aborder un caractère « relique », toujours présent mais qui n'a plus de fonction en terme d'isolation thermique chez l'Homme. C'est aussi une réaction physiologique car non consciente.
- **Document 6** : Schéma de la vasoconstriction (diminution du diamètre des vaisseaux sanguins à proximité de la peau) et de sa conséquence : la diminution des pertes de chaleur.
La manifestation visible à l'échelle macroscopique est le blanchissement de la peau.
C'est un exemple de réaction physiologique (non consciente).
- **Document 7** : Ce document présente différentes réactions comportementales en réponse à une baisse de la température :
 - Se couvrir : va avoir pour conséquence de réduire les pertes de chaleur par convection et évaporation majoritairement. Le coefficient lié aux vêtements vu dans les documents 1 à 4 de l'activité 1 va être diminué et le flux d'énergie thermique va être moins important.
 - S'abriter du vent : va diminuer les phénomènes de convection, mais aussi d'évaporation car l'air au contact de la peau étant peu renouvelé, sa pression de vapeur d'eau augmente et donc les transferts de chaleur seront limités.
 - Se déplacer vers une source de chaleur : va permettre un flux de chaleur positif du fait des radiations infrarouges de la source de chaleur (feu, poêle, etc...).
 - Se recroqueviller ou se coller les uns contre les autres permet de réduire la surface entre le corps et l'extérieur, donc de réduire la surface d'échanges thermiques (voir le rôle de la surface dans les formules des documents 1 à 4 de l'activité 1). Ainsi la thermolyse va être réduite.
- **Document 8** : Le frisson est présenté comme une réaction physiologique, car non consciente. Les cellules musculaires se contractent sans production de travail musculaire, ce qui augmente la thermogénèse. En effet, l'énergie chimique provenant de l'alimentation est transformée en énergie mécanique dans les cellules musculaires, mais avec un rendement énergétique faible. L'énergie perdue est libérée sous forme de chaleur.

Suggestions de questions :

- 1. Décrivez les principales réactions physiologiques en réponse à une baisse de la température. En quoi diffèrent-elles des réactions comportementales ?
- 2. Expliquez les conséquences des différentes réactions physiologiques sur le bilan thermique global du corps lors d'une baisse de la température.

- **3.** Quel organe du corps humain semble avoir un rôle prédominant dans ces deux types de réactions ?
- **4.** Expliquez les conséquences des différentes réactions comportementales sur les pertes thermiques par rayonnement, convection, conduction et évaporation.

Ressources complémentaires :

- Animation sur la régulation de la température au niveau de la peau (équivalent du document 1) :
https://www.larousse.fr/encyclopedie/animations/R%C3%A9gulation_thermique/1100417
- Vidéo sur la thermorégulation par les vaisseaux sanguins (Vasodilation / vasoconstriction) :
<https://www.youtube.com/watch?v=jGLmyZVk7GM>
- C'est pas sorcier, *Resister au froid*, 2013,
<https://www.youtube.com/watch?v=lbj9VOcp06I>

3.3. Les indicateurs de réussite

- **Groupe 1 :**
 - **1.** Lorsque la température augmente, les thermorécepteurs de la peau envoient un signal à l'hypothalamus qui va déclencher des réactions physiologiques qui sont non-volontaires (vasodilatation et sudation) et comportementales qui sont volontaires (se dévêtement, s'humidifier la peau, etc.).
 - **2.** La peau correspond à l'enveloppe thermique du corps (lieu de la majeure partie de la thermolyse), qui est située à l'interface entre le noyau thermique (lieu de la thermogenèse) et le milieu extérieur. C'est donc un lieu privilégié pour la régulation de l'intensité des flux thermiques liés à la thermolyse.

On voit que la peau a un rôle important dans les réactions à une hausse de la température :

- Un rôle de capteur par l'action des thermorécepteurs : thermorécepteurs
- Un rôle de régulateur (effecteur)
 - => les vaisseaux sanguins présents sous la peau peuvent se dilater (vasodilatation) et ainsi augmenter les pertes de chaleur au niveau de la peau.
 - => Les glandes sudoripares peuvent sécréter la sueur à la surface de la peau et ainsi augmenter les pertes thermiques par évaporation.

- **3.**
 - La vasodilatation permet de faire passer un débit sanguin plus important à proximité de la surface de la peau. La chaleur du sang va donc plus facilement être transférée par conduction jusqu'à la surface de la peau.
 - La sudation va augmenter les pertes de chaleur par évaporation à la surface de la peau.
 - Se dévêtement va avoir pour conséquences d'augmenter les pertes de chaleur par convection et évaporation majoritairement.
 - Se couvrir de tissus clairs va limiter l'apport d'énergie par le rayonnement solaire. La lumière, dont les infrarouges, seront moins absorbés par les vêtements et donc le corps aura un flux thermique entrant moins important.



- S'humidifier la peau va avoir le même effet que dans le cas d'une transpiration. L'évaporation, phénomène endothermique, va faire augmenter la thermolyse.
- S'exposer à un courant d'air va augmenter les phénomènes de convection, mais aussi d'évaporation car l'air au contact de la peau étant renouvelé très rapidement, sa pression de vapeur d'eau n'augmente pas de manière significative, garantissant des transferts d'énergie thermique plus importants.

- **Groupe 2 :**

- 1. Lorsque la température diminue, les thermorécepteurs de la peau envoient un signal à l'hypothalamus qui va déclencher des réactions physiologiques qui sont non-volontaires (vasoconstriction, chair de poule, frissons) et comportementales qui sont volontaires (se couvrir, s'abriter du vent, se rapprocher d'une source de chaleur, se recroqueviller ou se coller les uns contre les autres, etc.).
- 2. La peau correspond à l'enveloppe thermique du corps (lieu de la majeure partie de la thermolyse), qui est située à l'interface entre le noyau thermique (lieu de la thermogénèse) et le milieu extérieur. C'est donc un lieu privilégié pour la régulation de l'intensité des flux thermiques liés à la thermolyse.

On voit que la peau a un rôle important dans les réactions à une baisse de la température :

- un rôle de capteur par l'action des thermorécepteurs
- un rôle de régulateur (effecteur)
 - => les vaisseaux sanguins présents sous la peau peuvent se contracter (vasoconstriction) et ainsi diminuer les pertes de chaleur au niveau de la peau.
 - => Chez les mammifères à fourrure, les muscles des érecteurs des poils peuvent redresser les poils et ainsi créer une couche isolante plus épaisse autour de la peau. Chez l'Homme, la faible densité des poils ne permet cependant pas à la « chair de poule » d'être efficace en termes d'isolation thermique.
 - => Les muscles peuvent se contracter de façon répétitive sans réaliser de travail mécanique (frisson), et ainsi libérer de la chaleur, ce qui augmente la thermogénèse.
- 3.
 - La vasoconstriction permet de faire passer un débit sanguin moins important à proximité de la surface de la peau. La chaleur du sang va donc être transférée moins efficacement par conduction jusqu'à la surface de la peau.
 - Les frissons vont augmenter la thermogénèse.
 - Se couvrir va avoir pour conséquences de diminuer les pertes de chaleur par convection et évaporation majoritairement.
 - S'abriter du vent va diminuer les phénomènes de convection, mais aussi d'évaporation car l'air au contact de la peau étant peu renouvelé, sa pression de vapeur d'eau va augmenter, diminuant ainsi transferts de chaleur par évaporation.
 - Se rapprocher d'une source de chaleur va permettre un flux thermique entrant par rayonnement.
 - Se recroqueviller ou se serrer les uns contre les autres va avoir pour conséquences de réduire la surface d'échange entre le milieu extérieur et l'intérieur du corps. Ainsi, cela va diminuer la valeur des quatre flux thermiques responsables du bilan thermique humain.

3.4. Ajout libre

Autres indicateurs possibles (version experts) :

4. Avoir expliqué comment les différentes réactions comportementales évoquées peuvent faire varier les différents modes de thermolyse, à partir des formules de l'activité 1.
5. Avoir réalisé un schéma de thermorégulation dans le cas d'un flux de chaleur positif / négatif.

Exercices

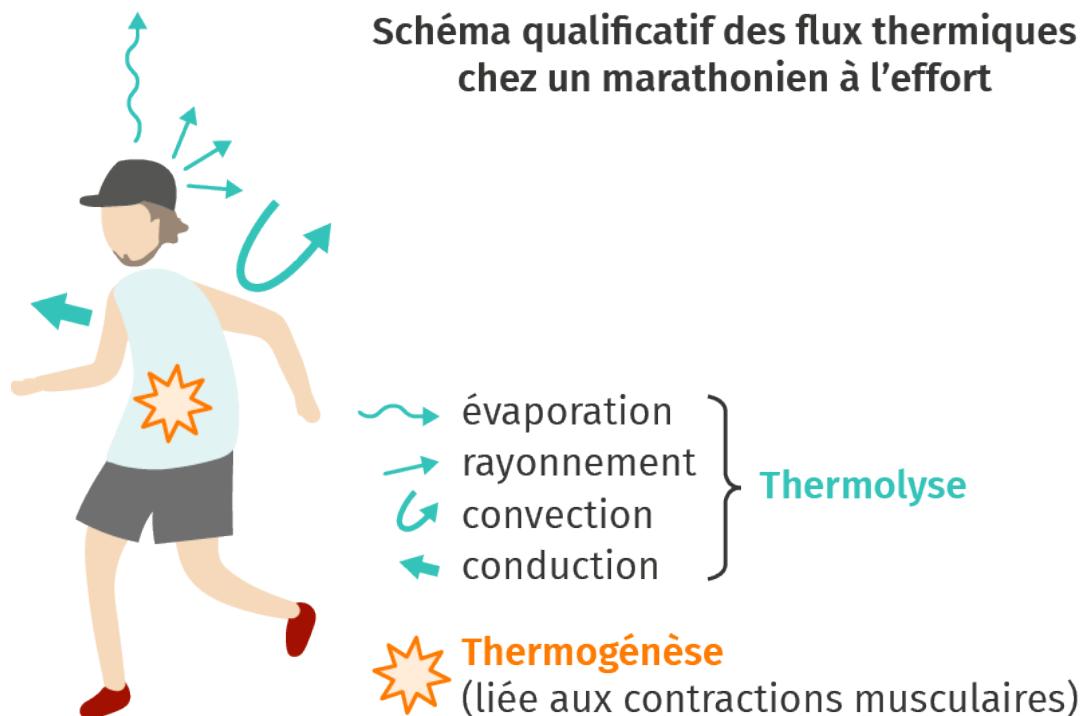
4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Le flux thermique chez les marathoniens

Compétence principalement travaillée : Représenter sur un schéma qualitatif les différents échanges d'énergie entre l'organisme et le milieu extérieur.

Correction :

1.



2. Une augmentation de la température corporelle correspond à un flux thermique globalement positif vers l'intérieur du corps. Chez un marathonien, les pertes d'énergie thermique par conduction, convection, radiation et évaporation (liée à la transpiration) ne compensent plus complètement l'énergie thermique libérée lors des contractions musculaires.

Exercice 2 : La balance énergétique d'un champion olympique

Compétence principalement travaillée : Utiliser des données quantitatives sur l'apport énergétique d'aliments dans un bilan d'énergie correspondant à des activités variées.

Correction :

1. La dépense énergétique correspond à la somme du métabolisme de base (ici 1500 kcal/jour) et de l'activité physique (ici 5 heures à la puissance de 1500 W).

Il faut d'abord calculer l'énergie associée à l'activité physique :

1500 W correspondent à 1500 J.s^{-1} , et il faut donc convertir la durée en secondes, donc 5 heures correspondent à $5 \times 3\,600 = 18 \cdot 10^3$ secondes.

$$E = 1\,500 \times 18 \cdot 10^3 = 27 \cdot 10^6 \text{ J} = 27 \cdot 10^3 \text{ kJ.}$$

1 kcal = 4,184 kJ donc l'activité physique de Mickaël Phelps correspond à :

$$E = 27 \cdot 10^3 / 4,184 = 6\,453 \text{ kcal.}$$

La dépense énergétique journalière de Mickaël Phelps est donc de :

$$E_{\text{tot}} = 1500 + 6\,453 = 7\,953 \text{ kcal.}$$

Les 8 000 kcal par jour consommés par l'athlète sont donc bel et bien dépensés.

2. Sa balance énergétique est donc équilibrée.

Exercice 3 : Cigarette et thermorégulation

Compétence principalement travaillée : Argumenter scientifiquement.

Correction :

On observe sur le thermogramme (imagerie infrarouge) que 5 minutes après avoir fumé, la température des bras et des doigts diminue d'environ 10°C. L'effet vasoconstricteur de la nicotine entraîne un flux moins important de sang vers les extrémités qui perdent en température dans un environnement froid.

En revanche, la chaleur de la cigarette, pendant qu'elle est maintenue au bout des doigts, peut libérer de la chaleur par rayonnement et par conduction.

Il peut être intéressant de modérer son propos, en disant que si la périphérie thermique est refroidie du fait de l'effet vasoconstricteur, le noyau thermique va mieux conserver sa chaleur et donc il pourra en résulter une sensation de chaleur (suivant la position des thermorécepteurs en jeu).

Par ailleurs, l'inhalation d'air chaud (réchauffé par la cigarette) et de fumée au sein des poumons et peut permettre de réchauffer le sang qui irrigue les alvéoles pulmonaires.

4.2. Le repaire des initiés

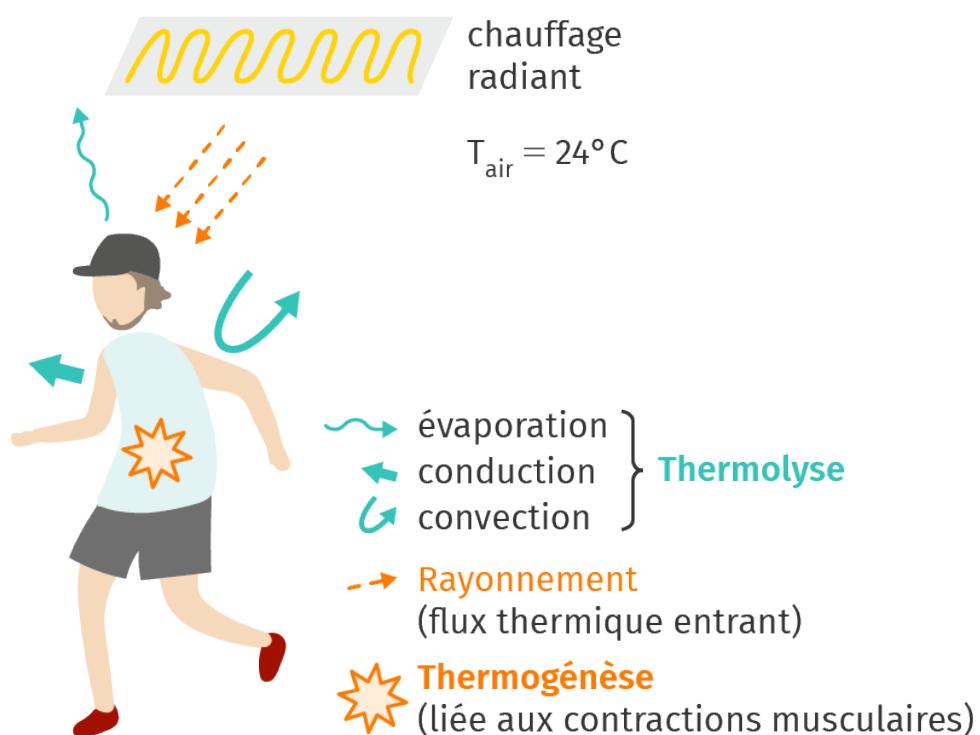
Exercice 4 : Des sportifs sous chauffages radiants

Compétence principalement travaillée : Représenter sur un schéma qualitatif les différents échanges d'énergie entre l'organisme et le milieu extérieur.

Correction :

1.

Schéma qualificatif des échanges thermiques entre un sportif et son milieu dans un gymnase chauffé par chauffages radiants



2. L'utilisation de chauffages radiants permet de réchauffer les surfaces solides, donc le sol du gymnase mais aussi les sportifs présents dans ce gymnase, sans réchauffer l'ensemble du volume d'air du gymnase (ce qui est le principe d'un chauffage convecteur plus classique). Ainsi, une personne placée sous ce chauffage radiant aura un bilan thermique proche de l'équilibre, car les pertes de chaleur par convection, conduction et évaporation seront compensées par le gain de chaleur par radiations, ainsi que par la thermogenèse liée à l'activité physique de la personne. Le bilan thermique étant équilibré, aucune sensation de froid ne sera ressentie, même dans un air de température bien inférieure à la température corporelle.



Exercice 5 : Junk food et apports énergétiques

Compétence principalement travaillée : Utiliser des données quantitatives sur l'apport énergétique d'aliments dans un bilan d'énergie correspondant à des activités variées.

Correction :

1. On prend la masse de chacun des aliments par portion en grammes, divisée par les 100 grammes de la valeur énergétique de référence et multipliée par cette valeur énergétique pour 100g.

Sandwich kebab seul sans sauce :

$$(160 / 100) \times 250 + (170/100) \times 180 + (110 / 100) \times 30 = 400 + 306 + 33 = 739 \text{ kcal}$$

Menu complet :

$$739 + (25 / 100) \times 400 + 400 + 150 = 739 + 100 + 400 + 150 = 1389 \text{ kcal}$$

2. Ainsi on peut calculer le pourcentage que représente cet apport du menu complet par rapport aux apports journaliers recommandés :

$$(1389 / 2000) \times 100 = 69,45 \%$$

Une seul menu kebab complet correspond donc environ 70% des apports journaliers recommandés.

3. On cherche à calculer le temps de courses à la puissance de 500W permettant de dépenser les 1389 kcal.

On convertit d'abord l'énergie en Joules : $1389 \text{ kcal} = 1389 \times 4184 \text{ J} = 5,812 \times 10^6 \text{ J}$.

D'après la formule reliant puissance et énergie : $t = E/P = 5,812 \times 10^6 / 500 = 11\,624 \text{ secondes} = 194 \text{ minutes} = 3 \text{ heures et 14 minutes}$.

Il faut donc 3h14 à 8 km/h pour dépenser l'énergie absorbée lors d'un « menu complet ».

Cette valeur est valable pour un individu de poids moyen, car tout excès de poids par rapport à cette moyenne entraîne une dépense énergétique plus importante pour garder une vitesse de 8 km/h.

4.3. Le coin des experts

Exercice 6 : Montres connectées et dépense énergétique

Compétence principalement travaillée : Exercer son esprit critique.

Correction :

1. Lors des mesures par calorimétrie indirecte, on mesure la quantité de dioxygène consommé, ce qui permet de connaître précisément la dépense énergétique, car on sait qu'un litre d'O₂ correspond à une énergie dépensée d'environ 4,8 kcal.

Cependant, ces mesures nécessitent un spiromètre qui mesure le débit ventilatoire (le volume d'air renouvelé dans les poumons en une minute) ainsi que la concentration de l'air expiré en O₂. Ce dispositif est très contraignant et ne permet des mesures que lors d'expériences contrôlées. Il peut donc être intéressant d'avoir une mesure plus simple donnant accès à la dépense énergétique, même si cela s'accompagne d'une perte de précision.



2. On observe que pour chacune des deux femmes, il y a une relation globalement de type affine entre dépense énergétique et fréquence cardiaque. Cependant, les relations sont différentes (pente, ordonnée à l'origine) entre la femme sédentaire et la femme sportive.

Pour que l'algorithme de la montre puisse s'adapter à tous les sujets, il pourrait être intéressant d'entrer un indicateur de la quantité d'entraînement (nombre d'entraînements par semaine, type de sport, VO₂max, FC repos, etc.).

Exercice 7 : Graisse blanche et graisse brune

Compétence principalement travaillée : Comprendre le lien entre structure et fonction.

Correction :

Les adipocytes blancs sont des cellules de grande taille (30 à 150 µm), contenant une seule gouttelette lipidique et peu de mitochondries. La surface d'échange entre le cytoplasme de la cellule (de volume très faible) est donc réduite au minimum, et l'énergie contenue dans la gouttelette n'est presque pas utilisée par le faible nombre de mitochondries de la cellule. Le tissu étant peu vascularisé, on peut considérer qu'il y a relativement peu d'échanges entre ces cellules et le sang. Ces cellules sont donc spécialisées dans le stockage à long terme de l'énergie sous forme de graisses.

Le tissu adipeux blanc est intra-musculaire, viscéral et sous-cutané et réparti dans l'ensemble du corps. Le tissu sous-cutané permet aussi une isolation thermique, du fait de la conductivité thermique très faible des graisses.

À l'inverse, les adipocytes bruns sont des cellules plus petites, contenant un grand nombre de gouttelettes lipidiques et de nombreuses mitochondries. Ainsi, il y a une plus grande surface d'échanges entre les gouttelettes et le cytoplasme des cellules, qui utilisent ainsi l'énergie contenue dans les lipides au niveau des mitochondries.

NB : les mitochondries du tissu adipeux brun ont la particularité de perdre presque la totalité de l'énergie contenue dans les lipides sous forme de chaleur lors de la production d'ATP (le rendement est donc faible et très peu d'ATP est effectivement produit pour une quantité de lipides donnée).

Le tissu étant richement vascularisé, la chaleur produite par cette thermogenèse peut être transférée aux autres organes, et les stocks de lipides peuvent facilement être renouvelés. On voit aussi que ce tissu adipeux est situé à proximité du système nerveux central (cerveau + moelle épinière), ce qui facilite la thermorégulation dans ces organes vitaux.

Exercice numérique supplémentaire :

BIENTÔT DISPONIBLE.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique

Chapitre 8 : La forme de la Terre

Introduction

Présentation

Le chapitre est divisé en 4 parties :

- Il commence par l'historique de la démonstration de la sphéricité de la Terre avec Platon, qui en a l'idée dès l'Antiquité, puis Aristote, qui apporte des arguments à travers des observations d'éclipses lunaires. Ces notions sont vues dans l'activité documentaire 1.
- Le chapitre continue avec l'activité documentaire 2 qui porte sur les observations d'Eratosthène, une centaine d'années plus tard. Il étudia le phénomène qui explique qu'un bâton planté à Alexandrie le 21 juin à midi possède une ombre portée, alors qu'un bâton planté au même instant à Syène, plus au Sud, n'en a pas. Son expérience permet de calculer la longueur d'un méridien terrestre ainsi que le rayon terrestre.
- L'activité documentaire 3 montre comment fabriquer un sextant, instrument de mesure dont l'origine se situe au XVIII^e siècle. Cet instrument permet de déterminer la latitude du lieu d'où est prise la mesure. L'activité démontre l'intérêt qu'a eu l'Homme de se repérer sur Terre, en particulier pour la navigation.
- Se repérer sur Terre nécessite deux grandeurs : la latitude et la longitude ; mais aussi une unité de longueur commune à chaque pays. L'activité documentaire 4 explique l'origine de la définition du mètre et sa détermination par Delambre et Méchain par la méthode de triangulation. Elle propose un TP dans lequel est effectuée une mesure de longueur par la méthode de triangulation, à partir d'angles donnés.

Ce qui est enseigné au cycle 4

- En cycle 4 :
 - Les mesures d'angles sont abordées en Mathématiques avec l'unité «degré», le radian intervient en Seconde.
 - La notion de latitude et longitude est abordée en Mathématique.
- En seconde :
 - La sphéricité de la Terre est admise dans les différents programmes de Sciences Physiques mais non démontrée.



Bibliographie

Wikipédia est une source de base suffisante pour faire des biographies brèves des scientifiques cités dans le chapitre, avec leurs travaux en lien avec ce chapitre: Aristote, Platon, Ératosthène, Delambre, Méchain, Aristarque de Samos.

Sitographie

- Vidéo "Les Mystères du Cosmos- Les pionniers de l'Astronomie" (10min) disponible sur Youtube : <https://www.youtube.com/watch?v=tfJguXPRwcc>.
Cette vidéo peut introduire l'ensemble du thème "La Terre, un astre singulier" puisqu'elle balaye l'histoire de l'astronomie et des connaissances sur la Terre et sa place dans l'Univers. Elle décrit, entre autre, la forme "originale" attribuée à la Terre par les Hindous (V^e siècle avant JC), l'expérience d'Ératosthène, puis elle cite tous les scientifiques ayant contribué à la description de l'organisation du système solaire.
- Article du National Géographique: "Non, la Terre ne repose pas sur le dos d'une tortue géante", disponible sur : <https://www.nationalgeographic.fr/espace/non-la-terre-ne-repose-pas-sur-le-dos-d'une-tortue-geante>.
Ce texte explique "le géoterrapinism", théorie qui prétendait que la Terre était un disque. Elle peut être intéressante dans le cadre d'une recherche documentaire avant de commencer le chapitre car elle est en lien avec l'idée reçue du chapitre. Les activités documentaires du chapitre déconstruisent ensuite cette théorie.
- Vidéo de l'éclipse du 27 juillet 2018 sur le site Futura-Sciences qui donne des explications, des schémas, et des horaires. Expliquée de façon simple et claire, elle est disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronomie-eclipse-totale-lune-ne-manquez-pas-ce-soir-plus-longue-siecle-10445/>.

Sommaire

- **Activité 1 - documentaire** : La Terre est sphérique ! p. 136
- **Activité 2 - documentaire** : Détermination de la longueur du méridien terrestre par Ératosthène p. 138
- **Activité 3 - documentaire** : Se repérer sur Terre p. 139
- **Activité 4 - documentaire** : Mesure de la longueur du méridien terrestre par Delambre et Méchain p. 140



Activité 1 : La Terre est sphérique ! (documentaire)

1. Généralités

1.1 Objectifs

L'activité a deux objectifs :

- Historique : montrer à travers trois documents (**Doc.1 à Doc.3**) comment, dès l'Antiquité, la sphéricité de la Terre a été annoncée, alors qu'elle apparaît plane localement.
- Démarche scientifique : réalisation d'un schéma d'une éclipse lunaire et des différentes formes visibles de la Lune au cours de cette éclipse à l'aide de documents à exploiter.

À travers l'analyse de deux documents et des tracés de rayons lumineux et des différentes positions Soleil-Terre-Lune, les élèves abordent les différentes formes visibles de la Lune et montrent comment elles prouvent la sphéricité de la Terre. Le **doc.4**, plus contemporain, justifie quant à lui les irrégularités dans la sphéricité de la Terre.

1.2 Liens avec le programme

- **Savoir** : Dès l'Antiquité, des observations de différentes natures ont permis de conclure que la Terre était sphérique, alors même que localement, elle apparaît plane dans la plupart des expériences quotidiennes.
- **Savoir-faire** : Interpréter des documents présentant des arguments historiques permettant de discuter de la sphéricité de Terre, tracer des rayons lumineux, analyser les tracés, analyser un document pour expliquer les irrégularités dans la sphéricité de la Terre.

Durée : 30 minutes.

2. Présentation des documents

Document 1 : Aristote et la Terre ronde

Ce document montre que la sphéricité de la Terre est annoncée dès l'Antiquité par de simples observations et analyses faites par Aristote qui utilise la notion d'arguments « empiriques », socle de la démarche expérimentale du scientifique. De plus, ce document énumère brièvement quelques travaux d'Aristote, qui peuvent donner aux élèves l'envie d'aller plus loin, en faisant une recherche bibliographique plus approfondie par exemple.

Document 2 : L'éclipse de Lune du 27 juillet 2018

Schémas descriptifs de l'éclipse de Lune du 27 juillet 2018, avec les positions Soleil-Terre-Lune (avec tracé de l'orbite lunaire) au moment de l'éclipse totale et l'aspect de la Lune selon sa position dans la pénombre ou l'ombre de la Terre.

Document 3 : Apparence de la Lune à différents instants de l'éclipse

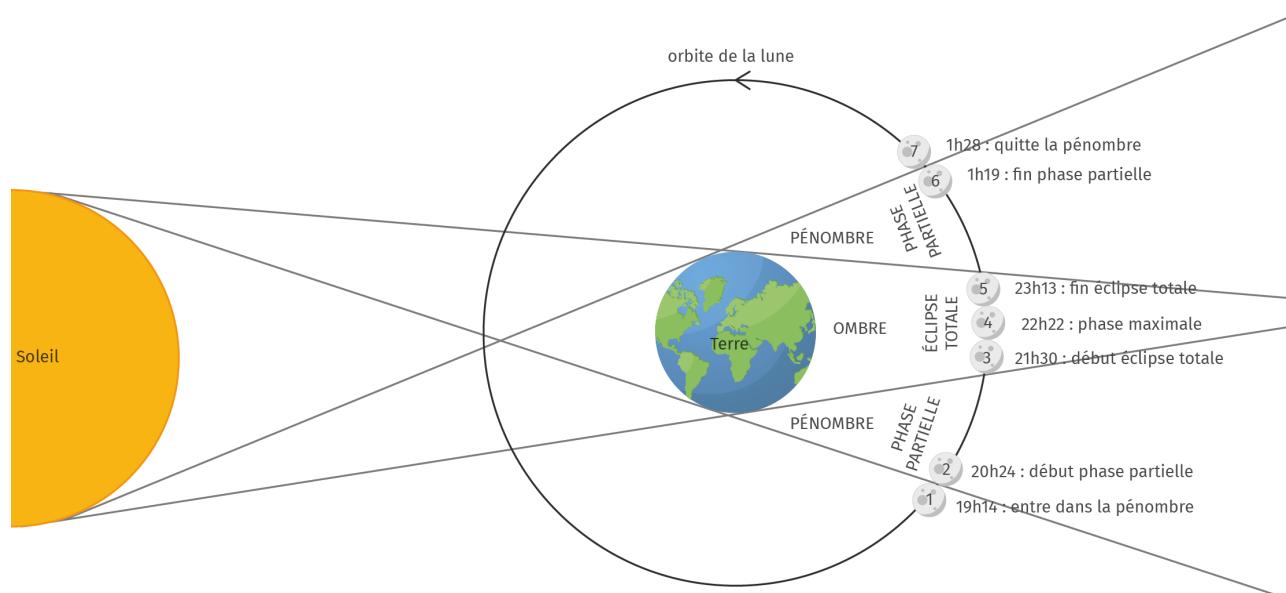
Photographies de la Lune au cours d'une éclipse.

Document 4 : La Terre change sans cesse de forme

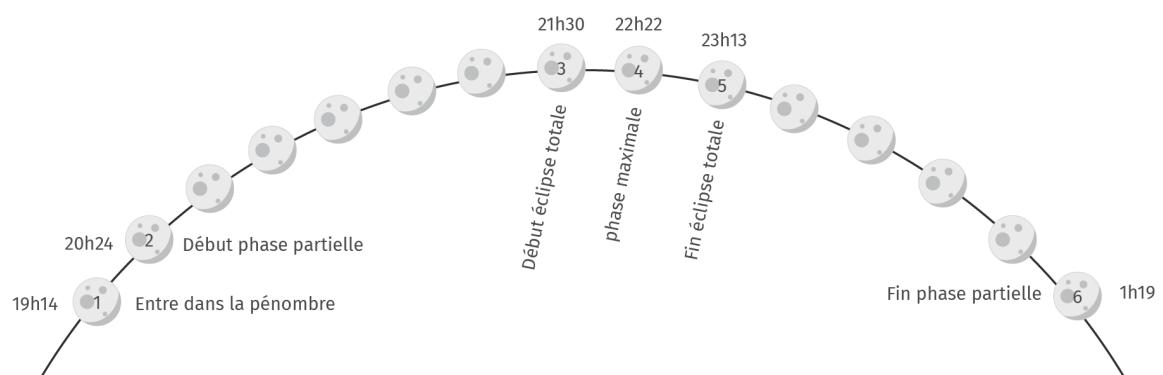
Il regroupe un texte, expliquant la répartition inégale des masses de la Terre, et un schéma, représentant cette répartition inégale (attention, dans ce schéma, les déformations dues aux inégalités sont exagérées d'un facteur 100 000 !).

3. Réponses attendues aux questions

1. **Doc. 1.** Les arguments apportés par Aristote sont qualifiés « d'empiriques » car ils ne se basent que sur des observations : de la forme circulaire de l'ombre portée de la Terre sur la Lune lors des éclipses de Lune, des changements de l'aspect du ciel lorsqu'on se déplace du Nord au Sud (apparition et disparition d'étoiles), etc.
2. **Doc 1.** Son hypothèse de la sphéricité de la Terre se base sur la forme circulaire de son ombre portée sur la Lune lors des éclipses.
- 3.



- 4.





5. **Doc 4.** Les irrégularités dans la sphéricité de la Terre sont dues à une répartition inégale des masses en surface et dans les profondeurs (croûte + manteau) car les matériaux qui la composent sont plus ou moins denses et les couches plus ou moins épaisses.

Activité 2 : Détermination de la longueur du méridien terrestre par Ératosthène (documentaire)

1. Généralités

1.1 Objectifs

Cette activité à deux objectifs :

- **Notionnel** : après avoir démontré la sphéricité de la Terre dans la première activité, elle propose l'étude d'un texte montrant la démarche réalisée par Eratosthène pour effectuer un calcul de la longueur du méridien terrestre.
- **Méthodologique** :
 - réaliser un schéma de l'expérience d'Eratosthène puis utiliser les données recueillies par celui-ci pour donner une valeur de la longueur du méridien terrestre avec le calcul de l'incertitude relative de la mesure obtenue.
 - L'activité mobilise aussi la capacité de l'élève à pouvoir tracer des rayons lumineux, et utiliser ces tracés pour réaliser des calculs.

1.2 Liens avec le programme

- **Savoir** : Des méthodes ont permis de calculer la longueur d'un méridien (environ 40 000 km) à partir de mesures d'angles et de longueur : méthode d'Eratosthène.
- **Savoir-faire** : calculer la longueur du méridien terrestre par la méthode d'Eratosthène, puis déterminer le rayon de la Terre à partir de la longueur du méridien.

Durée : 20 minutes

2. Présentation des documents

- **Document 1 : Les mesures d'Eratosthène**

Ce document explique comment Eratosthène a démontré, par observation d'ombres différentes, dans deux villes d'Egypte à la même heure, le 21 juin à midi, la courbure de la surface de la Terre. Il donne des valeurs d'angle et de distances permettant de calculer la longueur du méridien puis la valeur du rayon terrestre.

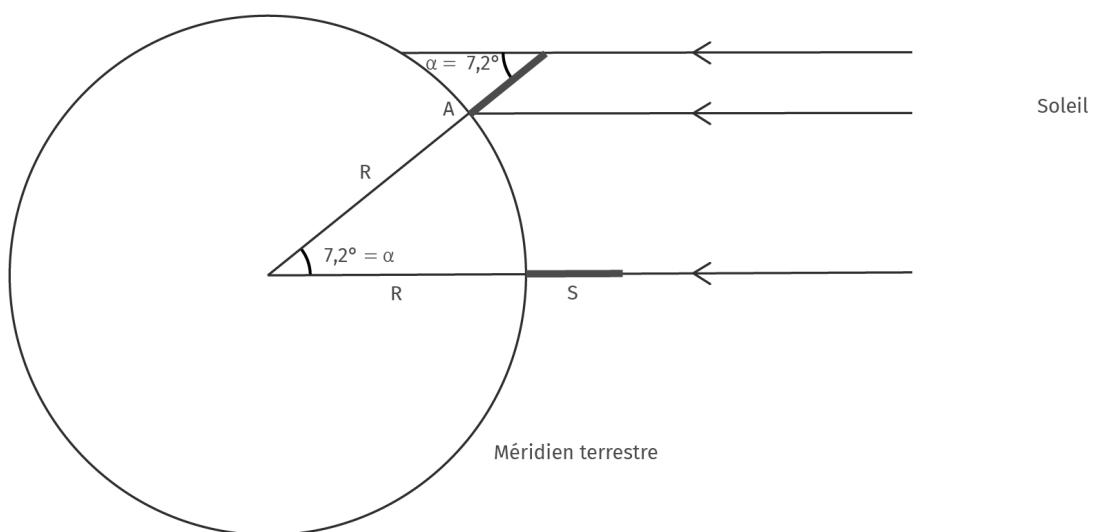
Il présente une carte de l'Egypte avec les deux villes concernées par son expérience, Syène et Alexandrie pour comprendre la situation.

- **Document 2 : Le Scaphé**

C'est une tige verticale d'un cadran solaire en forme de bol. Son utilisation met en évidence la notion d'ombre portée par une tige en fonction de l'inclinaison des rayons du Soleil.

3. Réponses attendues aux questions

1. Schéma réalisé avec les doc.1 et doc.2



L'arc de cercle obtenu par la position d'Alexandrie et de Syène sur le cercle représentant la Terre permet de définir un angle de $7,2^\circ$ entre les deux villes.

2. Doc.1 et Doc.2. Les chameaux ont parcouru 5 000 stades mesurant une longueur de 157,5 m, donc : $SA = 5\ 000 \times 157,5 = 787\ 500\ m = 787,5\ km$.

3.

| | |
|----------|-------------|
| L | 360° |
| 787,5 km | $7,2^\circ$ |

$$L = \frac{360 \times 787,5}{7,2} = 39\ 375\ km$$

Donc la longueur du méridien vaut .

4. Le rayon terrestre est :

$$SA = R \times \alpha \text{ donc } R = \frac{SA}{\alpha} \text{ avec } \alpha \text{ en radian. } R_{\text{estimé}} = 6267\ km \approx 6,3 \times 10^3\ km.$$

5. L'incertitude absolue se calcule selon la formule : .



$$\Delta R = |R_{\text{estimé}} - R_{\text{calculé}}| = |6,267 \times 10^3 - 6,371 \times 10^3| = 1,04 \times 10^2 \text{ km}$$

L'incertitude relative se calcule selon la formule :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1,04 \times 10^2}{6,371 \times 10^3} = 1,6 \times 10^{-2} = 1,6\%$$

Eratosthène a estimé le rayon terrestre à 71 km près !

Activité 3 : Se repérer sur Terre (documentaire)

1. Généralités

1.1 Objectifs

Cette activité remplit deux objectifs :

- **Notionnel** : la sphéricité de la Terre étant démontrée (Activité 1) et le calcul du méridien terrestre étant fait (Activité 2), se pose la question de se repérer sur la Terre à l'aide des coordonnées géographiques (latitude et longitude). L'activité aborde la notion de latitude et de déclinaison qui est l'angle entre la direction du Soleil et le plan de l'équateur.
- **Méthodologique** : réalisation d'un sextant simplifié à l'aide d'un matériel basique qui permette de déterminer la latitude du lieu où l'élève se trouve.

1.2 Liens avec le programme

- **Savoir** : On repère un point à la surface de la Terre par deux coordonnées angulaires, sa latitude et sa longitude (l'activité aborde la latitude).

Durée :

- 15 à 25 minutes : partie expérimentale. L'élève peut réaliser le sextant à partir du matériel en kit puis réaliser la mesure, ou ne faire que la mesure, ce qui sera moins long. Il est préférable que le sextant soit réalisé et utilisé en classe compte tenu des précautions d'utilisation d'un tel matériel (visée du Soleil).
- 10 à 15 minutes : réponses aux questions et schémas.

Compétences mobilisées :

Compétences techniques pour la réalisation du sextant si celui-ci est monté à partir de matériel en kit.

2. Présentation des documents

Document 1 : La latitude Φ d'un point de la surface

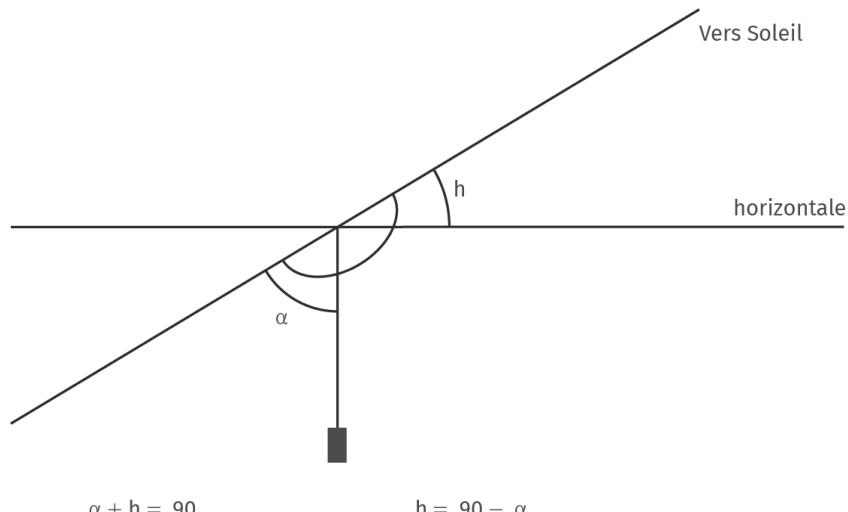
Ce document explique comment est définie la latitude Φ d'un point de la surface de la Terre à partir de deux grandeurs : la hauteur h du Soleil (angle entre la direction des rayons du Soleil et le plan horizontal) et la déclinaison δ du Soleil (angle entre la direction des rayons du Soleil et le plan de l'équateur).

**Document 2 : L'angle δ de déclinaison de la Terre**

Cet angle dépendant de la position de la Terre par rapport au Soleil, le lien numérique à suivre permet d'obtenir cette valeur à la date souhaitée. Il permettra ensuite dans le suivi des questions posées dans l'activité de déterminer la latitude à laquelle se trouve l'élève à la date considérée.

3. Réponses attendues aux questions

1. D'après le schéma du **Doc.1**, la latitude s'exprime par la relation : $\Phi - \delta + h = 90$ donc $\Phi = 90 + \delta - h$.
2. La relation entre h et α est : $\alpha + h = 90$ donc $h = 90 - \alpha$.



3. **Doc. 2** : Utiliser le lien numérique vers le calculateur pour déterminer la déclinaison δ de la position à laquelle se trouve l'élève le jour considéré.
4. Avec les données des questions précédentes, faire le calcul de la latitude Φ au point considéré.

Protocoles et résultats expérimentaux

TP : Fabrication et utilisation d'un sextant quand le Soleil est au zénith.

Le matériel basique listé permet de réaliser simplement et rapidement ce TP par les élèves. Il peut aussi être réalisé avant la séance en plusieurs exemplaires par le professeur. Son utilisation doit être encadrée. Il n'est pas conseillé de le faire réaliser avant par les élèves, chez eux, compte tenu des conditions d'utilisation avec des règles strictes de sécurité à respecter (principalement concernant la visée du Soleil).



Activité 4 : Mesure de la longueur du méridien terrestre par Delambre et Méchain (documentaire)

1. Généralités

1.1 Objectifs

L'activité répond à différents objectifs :

- **Notionnel** : cette activité décrit comment Delambre et Méchain, au XVIII^e siècle, ont mesuré la longueur d'une portion du méridien terrestre, par la méthode de triangulation. L'origine de cette mesure se trouve dans la nécessité de définir une unité de longueur commune à tous dans le contexte de la Révolution française. Cette unité sera le mètre, défini par la dix millionième partie du quart du méridien terrestre.
- **Méthodologique** : effectuer une mesure de longueur par la méthode de triangulation en utilisant les relations mathématiques liant les longueurs et les sinus des angles d'un triangle. La loi des sinus est fournie puisque sa connaissance n'est pas exigible.

1.2 Liens avec le programme

- **Savoir-faire** : Calculer une longueur par la méthode de triangulation utilisée par Delambre et Méchain.

Durée : 40 minutes.

Compétences mobilisées : utilisation du calcul littéral en mathématiques.

2. Présentation des documents

Document 1 : Première définition du mètre

Le document retrace brièvement l'histoire de la définition du mètre, suite à la demande de l'Assemblée Nationale Française pour établir un système de mesure de longueur unique. L'objectif était de faciliter les échanges entre les différents pays. La Terre, sphérique, est choisie comme référence : le mètre est la dix millionième partie du quart du méridien terrestre. Delambre et Méchain furent chargés d'effectuer les premières mesures.

Document 2 : La moitié Nord du méridien de Paris

Le document représente la Terre en trois dimensions où le tracé du quart du méridien terrestre passant par Paris est représenté. Il illustre le texte du document 1 qui définit littéralement le mètre.

Document 3 : Mesure du méridien par Delambre et Méchain

Le document explique comment Delambre et Méchain ont mesuré la longueur d'une portion du méridien terrestre passant par Dunkerque, Paris et Barcelone, ainsi que les problèmes qu'ils ont rencontrés.

Document 4 : Méthode de triangulation

Le document explique la méthode mathématique de mesure par triangulation. Il montre une carte avec le tracé d'une ligne reliant Dunkerque à Barcelone et, entre ces deux villes, les nombreux triangles ayant permis de calculer les longueurs de tous les segments constituant



la ligne.

3. Réponses attendues aux questions

1. Doc.1 Delambre et Méchain sont contemporains de la période de la Révolution Française (1789-1799), période de bouleversements sociaux et politiques.

2. Doc.1 Il a été indispensable de fixer des unités de mesure communes à tous les pays pour faciliter les échanges scientifiques, économiques et commerciaux.

3. Doc.1 C'est la Terre qui a été choisie comme « référence incontestable ». Le mètre est défini comme la 10 millionième partie du quart du méridien terrestre.

4. Doc.3 et Doc.4 Pour déduire la distance entre Barcelone et Dunkerque, Delambre et Méchain utilisent la méthode de triangulation qui se déroule en différentes étapes :

- choisir une base AB d'un triangle ;
- viser un point C à partir des extrémités A et B ;
- mesurer les angles CAB et CBA ;
- en déduire la distance BC.

5. Doc. 4

| | Réalité | Papier |
|------------------------------|---------|--------|
| Échelle | 100 km | 1,5 cm |
| Distance Dunkerque-Barcelone | 933 km | 14 cm |

La carte évalue la distance Dunkerque-Barcelone à : $d_{DB} = \frac{100 \times 14}{1,5} = 933 \text{ km}$, soit en toises: $933 \times 1000 \times 0,513\ 0174 = 478\ 698 \text{ toises}$.

6. Doc.3 et Doc.4 Les difficultés que rencontrent Delambre et Méchain pour effectuer leur mesures sont d'ordre social et politique : le contexte empêche les deux hommes de faire des mesures avec précision et sérénité. La guerre entre la France et l'Espagne compliquera d'autant plus les prises de mesure.

7. TP

- $\frac{AB}{\sin 99} = \frac{AO}{\sin 40} \rightarrow AO = AB \times \frac{\sin 40}{\sin 99} = 11 \times \frac{\sin 40}{\sin 99} = 7,2 \text{ km}$
- $\frac{OF}{\sin 41} = \frac{AO}{\sin 73} \rightarrow OF = AO \times \frac{\sin 41}{\sin 73} = 7,2 \times \frac{\sin 41}{\sin 73} = 4,9 \text{ km}$
- $\frac{OF}{\sin 31} = \frac{FB}{\sin 40} \rightarrow FB = OF \times \frac{\sin 31}{\sin 40} = 4,9 \times \frac{\sin 31}{\sin 40} = 3,9 \text{ km}$
- $\frac{FG}{\sin 37} = \frac{FB}{\sin 72} \rightarrow FG = FB \times \frac{\sin 37}{\sin 72} = 3,9 \times \frac{\sin 37}{\sin 72} = 2,5 \text{ km}$

Soit OG = OF + FG alors OG = 4,9 + 2,5 = 7,4 km.

Ainsi de suite, on détermine la longueur OE = 26,7 km.

8. Depuis la 17^e CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures), en 1983, le mètre est défini par : la longueur du trajet de la lumière parcouru dans le vide pendant une durée de 1 / 299 792 458^e de seconde.

Protocoles et résultats expérimentaux

TP : Mesure d'une portion de méridien

Matériel nécessaire : règle graduée + calculatrice

Protocole :

- Utiliser la loi des sinus en partant de la longueur du segment AB donnée dans l'énoncé et des angles indiqués dans le triangle ABO pour calculer le segment OF .
- Faire de même, de proche en proche, afin de calculer FG, GH, HE afin de calculer la longueur du segment OE.

Exercices

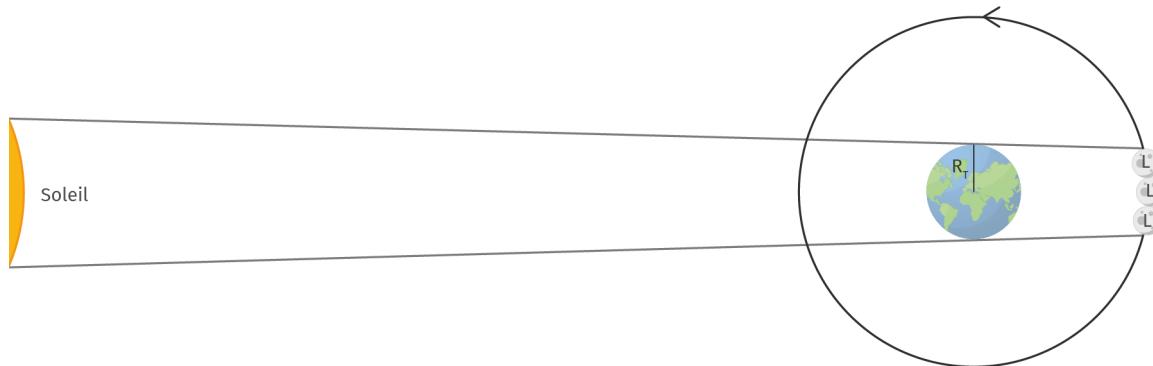
4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1- Détermination du diamètre de la Lune

Compétence principalement travaillée : Conduire des raisonnements qualitatifs et quantitatifs.

Correction :

1.



$$2. \quad 2R_T = 6R_L \text{ donc } R_L = \frac{R_T}{3}.$$

$$3. \quad v = \frac{d}{t} = \frac{2R_T}{4 \times 3\,600} = \frac{R_T}{7\,200}$$

$$4. \quad \text{Longueur } l \text{ de l'orbite de la Lune : } v = \frac{l}{700 \times 3\,600} = \frac{R_T}{7\,200} \text{ donc}$$
$$I = \frac{R_T \times 700 \times 3\,600}{7\,200} = R_T \times 350$$

5. Soit d_{TL} = distance Terre-Lune.

$$I = 2\pi \times d_{TL} \text{ donc } d_{TL} = \frac{I}{2\pi} = \frac{350 \times R_T}{2\pi} = \frac{350 \times 6\,370}{2\pi} = 354\,836 \text{ km}.$$

Le résultat est approximatif puisque le rayon de la Lune $R_L = \frac{R_T}{3}$ est approximatif.

Exercice 2 - Monaco-Berne

Compétences travaillées :

- Calculer la longueur d'un arc de méridien ou de parallèle
- Comparer les longueurs de différents chemins en deux points de la surface.

Correction p. 282 du manuel

Document sous licence libre Creative Commons



4.2. Le repaire des initiés

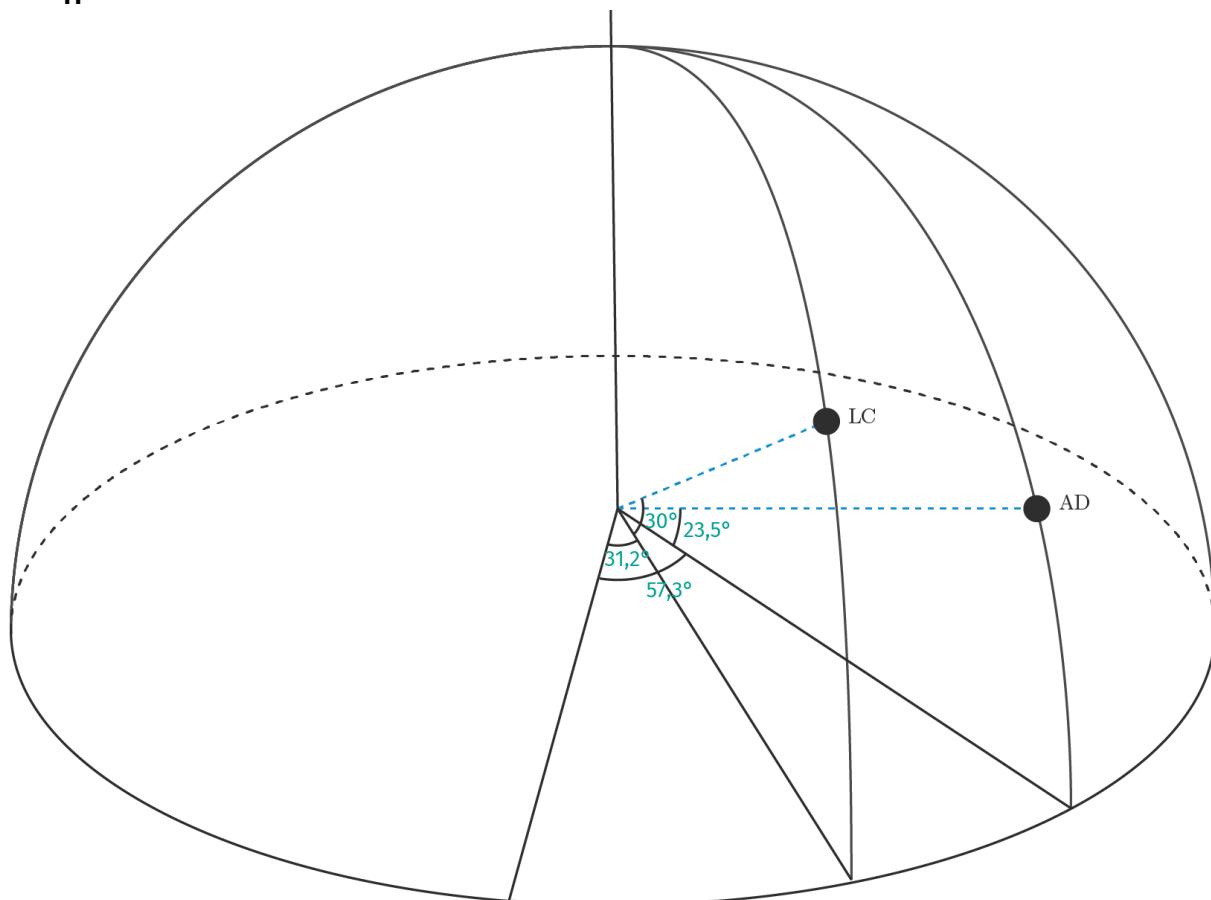
Exercice 3 - Solar Impulse

Compétence principalement travaillée : Calculer la longueur d'un arc de méridien ou de parallèle

Référence complémentaire : article Wikipédia qui renseigne sur les avions solaires Solar Impulse, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Solar_Impulse

Correction :

1.



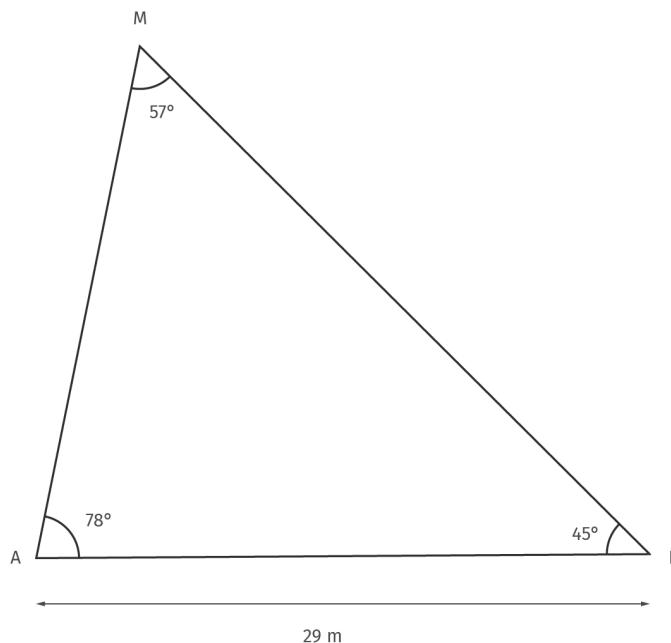
2. Calcul de la distance la plus courte entre Le Caire et Abu Dhabi

$$d_{LA} = \arccos(\sin(\phi_A) \cdot \sin(\phi_B) + \cos(\phi_A) \cdot \cos(\phi_B) \cdot \cos(\lambda_B - \lambda_A)) \cdot R_T$$

$$d_{LA} = \arccos(\sin(30, 0) \cdot \sin(23, 5) + \cos(30, 0) \cdot \cos(23, 5) \cdot \cos(53, 7 - 31, 2) \times \frac{2\pi}{360}) \times 6370 = 2343 \text{ km}$$

Exercice 4 - Le Vendée Globe

Compétence principalement travaillée : Calculer une longueur par la méthode de triangulation de Delambre et Méchain.

Correction :
1.

2. Calcul de la longueur MA :

$$\frac{AB}{\sin \widehat{AMB}} = \frac{MA}{\sin \widehat{MBA}} \text{ donc } MA = AB \cdot \frac{\sin \widehat{MBA}}{\sin \widehat{AMB}} = 29 \times \frac{\sin 45}{\sin 57} = 24 \text{ m}$$

Calcul de la longueur MB :

$$\frac{AB}{\sin \widehat{AMB}} = \frac{MB}{\sin \widehat{MAB}} \text{ donc } MB = AB \cdot \frac{\sin \widehat{MAB}}{\sin \widehat{AMB}} = 29 \times \frac{\sin 78}{\sin 57} = 34 \text{ m}$$

3. L'écart relatif sur MA vaut :

$$\Delta MA = \frac{|MA_{th} - MA_{exp}|}{MA_{th}} = \frac{|24,6 - 24|}{24,6} = 0,024 = 2,4 \%$$

L'écart relatif sur MB vaut :

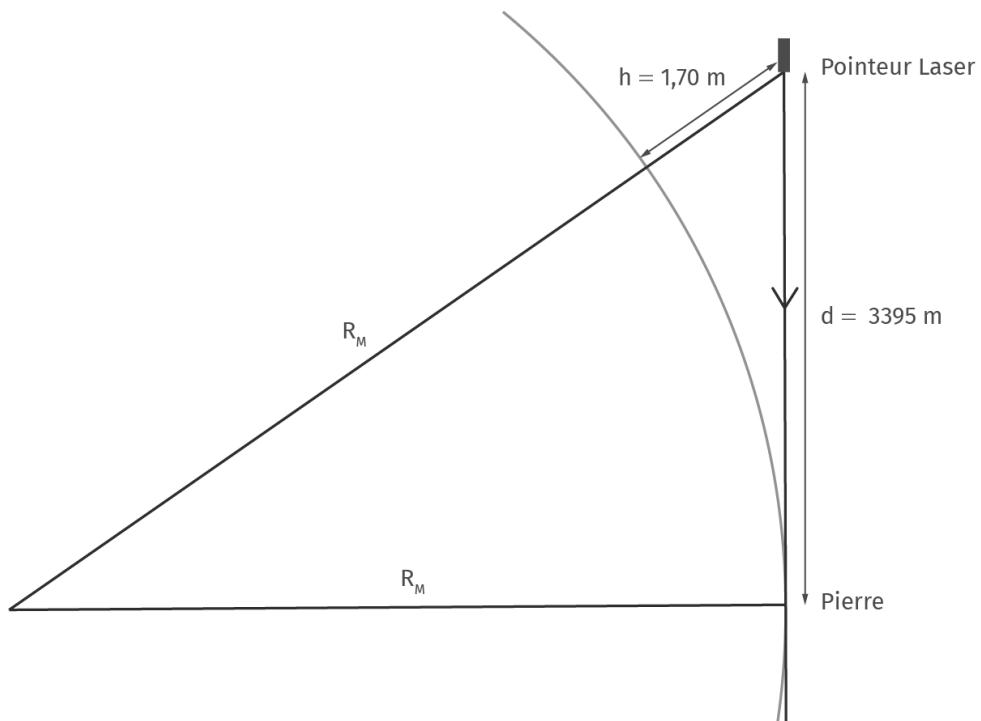
$$\Delta MB = \frac{|MB_{th} - MB_{exp}|}{MB_{th}} = \frac{|33,9 - 34|}{33,9} = 2,9 \times 10^{-3} = 0,29 \%$$

4.3. Le coin des experts

Exercice 5 - Mesure du rayon de Mars

Compétence principalement travaillée : Conduire un raisonnement quantitatif.

Correction :

1.

2.

$$\begin{aligned} R_M^2 + d^2 &= (R_M + h)^2 \\ R_M^2 + d^2 &= R_M^2 + 2R_M \cdot h + h^2 \\ d^2 &= 2R_M \cdot h + h^2 \end{aligned}$$

Le rayon de la planète Mars est donc :

$$R_M = \frac{d^2 - h^2}{2h} = \frac{3\,395^2 - 1,70^2}{2 \times 1,70} = 3,39 \times 10^6 \text{ m} = 3,39 \times 10^3 \text{ km} = 3\,390 \text{ km}$$

3. L'écart relatif sur le diamètre de Mars est :

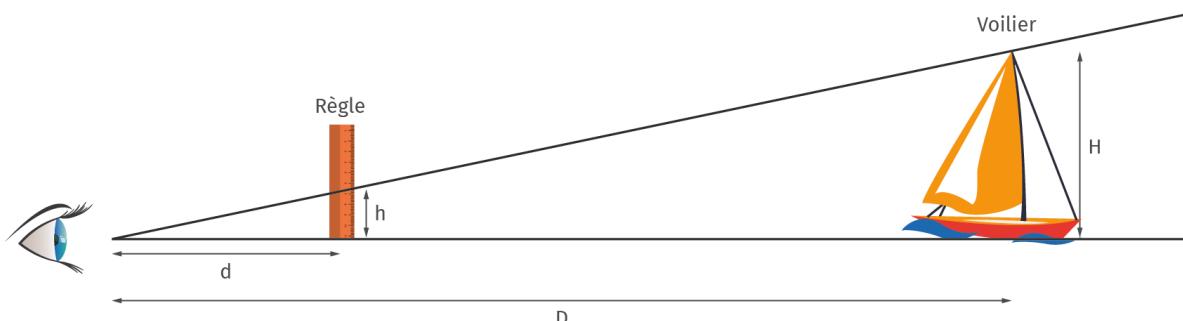
$$\Delta R_M = \frac{|R_{Mth} - R_{Mexp}|}{R_{Mth}} = \frac{|3\,389,5 - 3\,390|}{3\,389,5} = 1,48 \times 10^{-4} = 0,0148 \%$$

Exercice 6 - Mesure de distance par visée et calcul de vitesse

Compétences principalement travaillée : Exploiter et interpréter des mesures

Références complémentaires :

- Arnaquologie, vidéo qui détruit la théorie de la Terre plate, disponible sur :
<https://www.youtube.com/watch?v=E3cVSXHg4og>
- Vidéo en anglais, démontrer que la Terre est ronde, disponible sur :
<https://www.youtube.com/watch?v=-XuOxYXjioY>

Correction :
1.


À partir du schéma, on détermine à quelle distance D de la personne sur le rivage se trouve le voilier. À partir du théorème de Thalès :

$$\frac{h}{H} = \frac{d}{D} \rightarrow D = d \times \frac{H}{h} = 72 \times \frac{25}{1,3} = 1\ 384 \text{ m}$$

2. La distance D' qui le sépare du voilier 4 minutes plus tard se calcule tel que :

$$D' = d \times \frac{H}{h'} \rightarrow D' = 72 \times \frac{25}{0,9} = 2\ 000 \text{ m}$$

3. $D' - D = 2\ 000 - 1\ 384 = 616 \text{ m}$.

4.

$$v = \frac{d}{t} = \frac{616}{4 \times 60} = 2,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v = \frac{2,56 \times 3\ 600}{1\ 000} = 9,22 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$v = \frac{9,22}{1,852} = 4,99 \text{ noeuds} \approx 5 \text{ noeuds.}$$

5. Si le voilier n'est plus visible à l'horizon alors cela prouve que la Terre est sphérique !

4.3. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 1 : Distance Terre-Lune par la méthode des parallaxes (seulement dans le manuel numérique)

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé que l'exercice 1 : « Détermination du diamètre de la Lune » dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux experts et non plus aux apprentis.

Compétence principalement travaillée : Conduire des raisonnements qualitatifs et quantitatifs

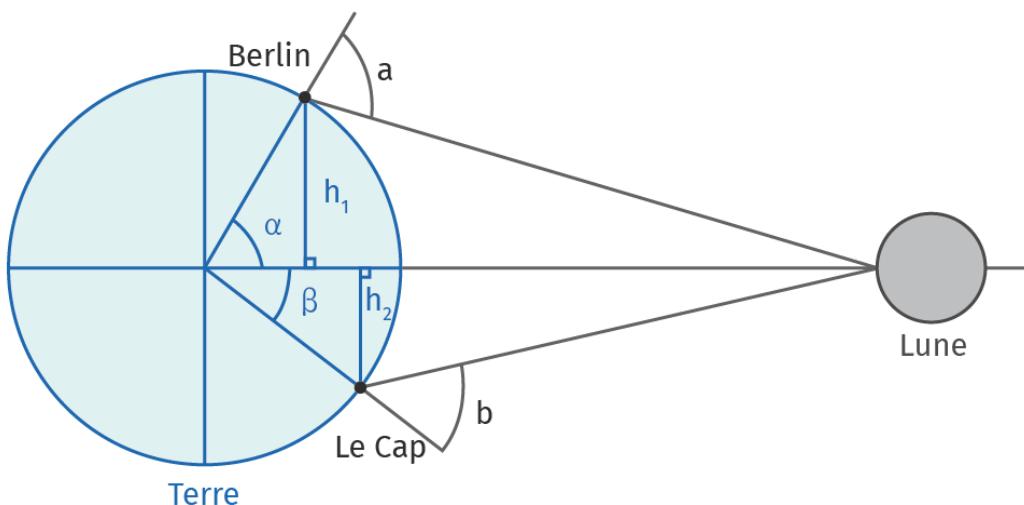
Références complémentaires : blog expliquant la méthode de triangulation pour calculer la distance Terre-Lune, disponible sur : <http://astronomie-smartsmur.over-blog.com/article-4-15-calcule-de-la-distance-terre-lune-par-la-triangulation-101834009.html>

Données :

| Ville | Latitude | Angle |
|--------|----------------------------|-------------------|
| Berlin | $\alpha = 52,5^\circ$ Nord | $a = 53,32^\circ$ |
| Cap | $\beta = 33,9^\circ$ Sud | $b = 34,66^\circ$ |

Rayon de la Terre : $R_T = 6\ 370\ km$

Documents :



Introduction : En 1751, Lalande se positionne à Berlin et Lacaille au Cap en Afrique du Sud. Ils observent chacun le centre du disque lunaire lors du passage au méridien de la Lune. Ils mesurent l'angle entre la verticale du lieu et le rayon provenant de la Lune.

Questions :

- Montrer que p , l'angle au sommet de la Lune, est lié à a , b , α et β par

$$p = (a + b) - (\alpha + \beta)$$
.
- Montrer que la distance d_{BC} qui sépare Berlin du Cap égale à $h_1 + h_2$, est également liée à R_T , $\sin \alpha$ et $\sin \beta$ par la relation : $d_{BC} = R_T \cdot \sin \alpha + R_T \cdot \sin \beta$.
- Donner l'expression de la tangente de p , $\tan(p)$, en fonction de d_{BC} et de la distance Terre-Lune d_{TL} .
- Donner alors l'expression de la distance Terre-Lune d_{TL} en fonction de $\tan(p)$ et de



d_{BC} pour montrer que $d_{TL} = R_T \cdot (\sin \alpha + \sin \beta) + \tan p$

5. Calculer d_{TL} .

Correction :

1. D'après le schéma, l'angle p au sommet de la Lune se calcule tel que :
 $(180 - a) + \alpha + \beta + (180 - b) + p = 360$ donc $p = (a + b) - (\alpha + \beta)$
2. La distance entre Berlin et le Cap d_{BC} vue de la Lune étant très proche de la distance $h_1 + h_2$, on peut écrire $d_{BC} = h_1 + h_2$. Or, $\sin \alpha = \frac{h_1}{R_T}$ et $\sin \beta = \frac{h_2}{R_T}$ donc $d_{BC} = R_T \cdot \sin \alpha + R_T \cdot \sin \beta = R_T \cdot (\sin \alpha + \sin \beta)$.
3. L'expression de $\tan(p)$ est : $\tan p = \frac{d_{BC}}{d_{TL}}$.
4. L'expression de la distance Terre-Lune est : $d_{TL} = \frac{d_{BC}}{\tan p} = \frac{R_T \cdot (\sin \alpha + \sin \beta)}{\tan p}$
5. La distance Terre-Lune est donc :

$$d_{TL} = \frac{R_T \cdot (\sin \alpha + \sin \beta)}{\tan p} = \frac{6\ 370 \times (\sin 52,5 + \sin 33,9)}{\tan(53,35 + 34,66 - (52,5 - 33,9))} = 3,18 \times 10^5 \text{ km}.$$

La valeur réelle se situe entre 356 410 km et 405 500 km selon la position de la Lune sur son orbite. La distance calculée avec les données de l'énoncé a un écart de 10,8 % par rapport à la valeur minimum, liées aux approximations faites en particulier sur h_1 et h_2 .

Exercice 4 : Le vendée Globe

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé et le même document que dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux apprentis et non plus aux initiés.

Compétence principalement travaillée : Calculer une longueur par la méthode de triangulation de Delambre et Méchain

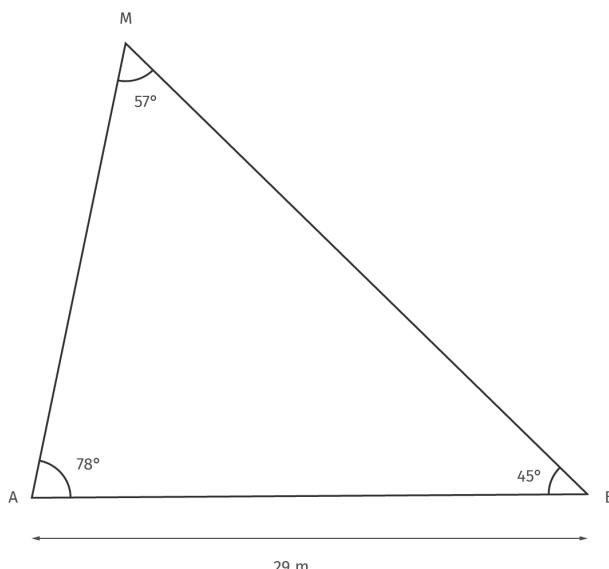
Questions :

1. Faites un schéma légendé de la situation en indiquant les angles mesurés. Déduire et indiquer l'angle \widehat{AMB} .
2. En utilisant les relations entre les sinus des angles et les longueurs dans un triangle, utilisées dans l'activité 3, écrire les relations de proportionnalité existant entre AB , $\sin \widehat{AMB}$, AM , $\sin \widehat{MBA}$, MB et $\sin \widehat{MAB}$.
3. Par triangulation, calculez alors les longueurs AM et MB qui séparent les observateurs aux extrémités du muret du mât du bateau.

- 4.** Deux pointeurs laser visent le sommet M du mât à partir des points A et B. Ils mesurent respectivement $AM = 24,6$ m et $BM = 33,9$ m. Comparer ces valeurs avec celles calculées précédemment en indiquant la précision de chacune des méthodes. La précision d'une distance mesurée d est égale à $\frac{\Delta d}{d}$, Δd étant l'incertitude, la précision s'exprime le plus souvent en %.

Correction :

1.



L'angle \widehat{AMB} vaut : $\widehat{AMB} = 180 - (78 + 45) = 57^\circ$.

2. La loi des sinus dans le triangle AMB s'écrit : $\frac{AB}{\sin \widehat{AMB}} = \frac{AM}{\sin \widehat{MBA}} = \frac{BM}{\sin \widehat{MAB}}$.

3. La longueur MA se calcule tel que : $\frac{AB}{\sin \widehat{AMB}} = \frac{MA}{\sin \widehat{MBA}}$ donc
 $MA = AB \cdot \frac{\sin \widehat{MBA}}{\sin \widehat{AMB}} = 29 \times \frac{\sin 45}{\sin 57} = 24$ m

4. L'écart relatif sur MA est :

$$\Delta MA = \frac{|MA_{th} - MA_{exp}|}{MA_{th}} = \frac{|24,6 - 24|}{24,6} = 0,024 = 2,4\%$$

L'écart relatif sur MB est :

$$\Delta MB = \frac{|MB_{th} - MB_{exp}|}{MB_{th}} = \frac{|33,9 - 34|}{33,9} = 2,9 \times 10^{-3} = 0,29\%$$



Exercice 5 : Mesure du rayon de Mars

Il s'agit d'un exercice numérique avec le même énoncé et le même document que dans le manuel papier. L'exercice est ici adressé aux initiés et non plus aux experts.

Compétence principalement travaillée : Conduire un raisonnement quantitatif

Introduction :

Dans le film *Seul sur Mars*, l'astronaute Mark Watney veut calculer le rayon R_M de Mars avec du matériel basique. Il se positionne dans une zone très dégagée de tout relief. Il positionne un pointeur laser sur un support à la hauteur $h = 1,70$ m. Il pointe son laser sur une pierre la plus lointaine qu'il puisse voir à l'horizon. La distance du laser à la pierre est : 3 395 m.

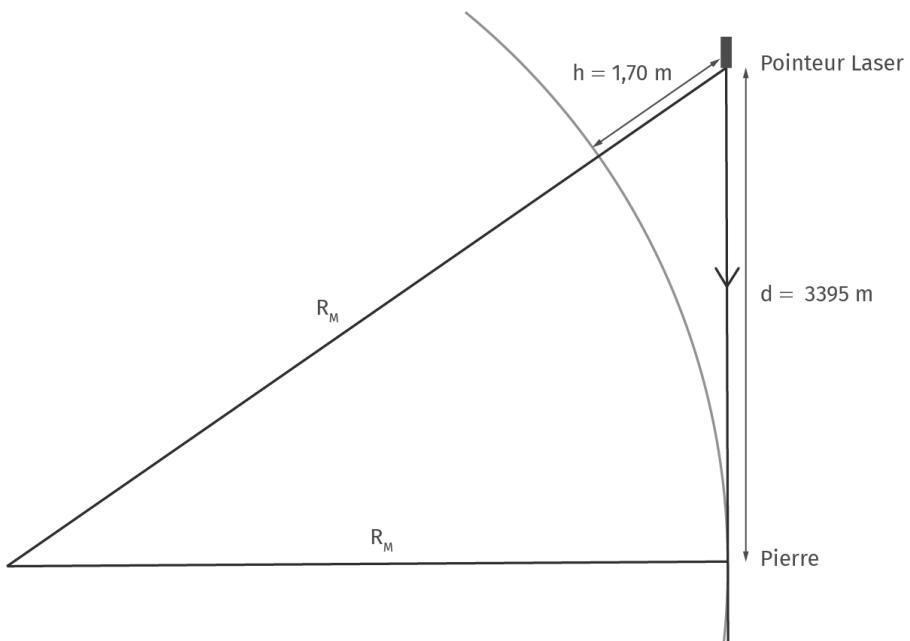
Questions :

1. Faire un schéma de son montage en traçant les rayons de Mars au point du support tenant le laser, et au point de la pierre. L'arc correspond à la distance entre le laser et la pierre, h la hauteur à laquelle se trouve le laser, d la distance qui sépare le laser de la pierre.

- $$R_M = \frac{d^2 - h^2}{2h}$$
2. Montrer que puis calculer, avec les mesures de Watney, la valeur du rayon de Mars.
 3. Comparer la précision de cette valeur avec celle de la valeur réelle de 3 389,5 km.

Correction :

1.



2. D'après le théorème de Pythagore, on a :



$$\begin{aligned} R_M^2 + d^2 &= (R_M + h)^2 \\ \rightarrow R_M^2 + d^2 &= R_M^2 + 2R_M \cdot h + h^2 \\ \rightarrow d^2 &= 2R_M \cdot h + h^2 \end{aligned}$$

Le rayon de la planète Mars se calcule donc :

$$\begin{aligned} R_M &= \frac{d^2 - h^2}{2h} = \frac{3\ 395^2 - 1,70^2}{2 \times 1,70} \\ &= 3,39 \times 10^6 \text{ m} = 3,39 \times 10^3 \text{ km} = 3\ 390 \text{ km.} \end{aligned}$$

3. L'écart relatif sur le diamètre de Mars vaut :

$$\Delta R_M = \frac{|R_{Mth} - R_{Mexp}|}{R_{Mth}} = \frac{|3\ 389,5 - 3\ 390|}{3\ 389,5} = 1,48 \times 10^{-4} = 0,0148 \%$$

Exercice numérique : Thomas Pesquet en orbite autour de la Terre

Compétence principalement travaillée : Conduire un raisonnement quantitatif

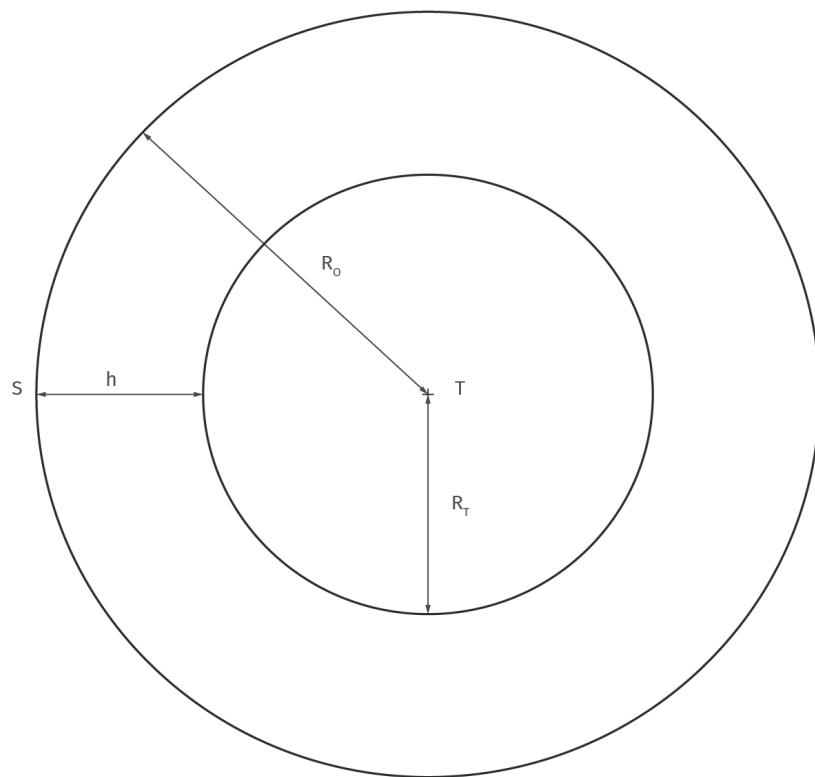
Introduction : Thomas Pesquet, astronaute français, a passé 196 jours dans la Station Spatiale Internationale (ISS) au cours de la mission Proxima. La station est à l'altitude $h = 370$ km de la Terre en orbite à la vitesse $v = 28\ 000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Le rayon de la Terre est $R = 6\ 370$ km.

Questions :

1. Schématiser l'orbite de l'ISS autour de la Terre, les centres de la Terre et de l'ISS étant représentés respectivement par les lettres T et S. Représentez R , h et R_O , rayon de l'orbite de l'ISS.
2. Exprimer le rayon R_O en fonction de R et h . Calculer R_O , puis calculer la longueur L_O ($2\pi R_O$) de cette orbite.
3. Quelle est la durée mise par l'ISS pour parcourir une orbite sachant qu'elle parcourt la distance L_O à la vitesse v ?
4. Combien de fois l'astronaute a-t-il fait le tour de la Terre au cours de son séjour ?
Commenter.

Correction :

- 1.



- 2.** Le rayon de l'orbite de l'ISS se calcule tel que : $R_{\text{ISS}} = R_T + h$.

La distance parcourue par l'ISS vaut :

$$L_{\text{ISS}} = 2\pi \cdot R_{\text{ISS}} = 2\pi \cdot (R_T + h) = 2\pi \times (6\ 370 + 730) = 4,46 \times 10^4 \text{ km}$$

- 3.** La durée de l'orbite de l'ISS est :

$$v = \frac{L_{\text{ISS}}}{\Delta t} \text{ donc } \Delta t = \frac{L_{\text{ISS}}}{v} = \frac{4,46 \times 10^4}{28\ 000} = 1,59 \text{ h} = 1 \text{ h } 36 \text{ min}$$

- 4.**

| | |
|-----------|------------------------------------|
| 1 tour | 1,59 h |
| x tours | $196 \times 24 = 4\ 704 \text{ h}$ |

Le nombre x de tours de la Terre effectués par Thomas Pesquet lors de son voyage dans

$$\text{ISS : } x = \frac{1 \times 194 \times 24}{1,59} = 2\ 922 \text{ tours}$$



Livre du professeur - Enseignement Scientifique - 1re

Chapitre 9 : L'histoire de l'âge de la Terre

Introduction

Présentation

Ce chapitre 9 aborde différentes méthodes qui ont été envisagées dans l'Histoire pour estimer l'âge de la Terre.

Il se découpe en 3 grandes parties :

- Une première partie avec les premières estimations de l'âge de la Terre : des croyances à la science ;
- La deuxième partie qui porte sur des méthodes expérimentales pour la détermination de l'âge de la Terre ;
- La troisième partie, sur l'utilisation de la radioactivité.

Plus qu'une progression historique de la détermination de l'âge de la Terre, ce chapitre met en avant l'approche scientifique expérimentale à travers différentes méthodes.

Ce qui est enseigné au cycles 3 et 4 ainsi qu'en 2de et 1re

- **Au cycle 3 et 4 :**
 - SVT :
 - Le changement de la biodiversité au cours du temps, notions de crises biologiques et de radiations évolutives
 - PC :
 - L'origine de la matière, du Big Bang aux atomes de nos molécules.
- **En 2de :**
 - SVT :
 - L'érosion et les dépôts sédimentaires.
 - Processus de fossilisation - la biodiversité passée
 - PC :
 - Identifier des isotopes.
 - Identifier la nature physique, chimique ou nucléaire d'une transformation à partir de sa description ou d'une écriture symbolique modélisant la transformation.
- **En 1re :**
 - Savoirs :
 - Certains noyaux sont instables et se désintègrent (radioactivité).
 - L'instant de désintégration d'un noyau radioactif individuel est aléatoire.
 - La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée.



- Cette demi-vie est caractéristique du noyau radioactif.
- Savoirs-faire :
 - Calculer le nombre de noyaux restants au bout de n demi-vies
 - Estimer la durée nécessaire pour obtenir une certaine proportion de noyaux restants.
 - Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie.
 - Utiliser une décroissance radioactive pour une datation (exemple du carbone 14).

Bibliographie

- *Éléments de géologie*, M. Renard, Y. Lagabrielle et al., Dunod, 2015.
- *Carbone 14 : Maître du temps* - N°18 - Les Savanturiers - Décembre 2016.
- *Hafnium–tungsten chronometry and the timing of terrestrial core formation*, Der-Chuen Lee & Alex N. Halliday. Nature 378, 1995, <https://doi.org/10.1038/378771a0>
- *Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography*, John W. Valley, Aaron J. Cavosie et al., Nature Geoscience, volume 7, p. 219–223 2014, <https://doi.org/10.1038/ngeo2075>

Sitographie

- <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/limites/Temps/datation-isotopique/comprendre/les-chronologies-mosaiques>
Dossier de l'Ifé sur l'âge de la Terre avant le début du 20è siècle.
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/histoire-age-Terre.xml>
Article : Quel âge a la Terre ? sur le site planet-terre de l'ENS de Lyon.
- <http://www.cea.fr/>
De la Recherche à l'Industrie, CEA.

Ressources complémentaires :

- Dossier sur la radioactivité du CEA (la plupart des animations proposées viennent de ce lien : <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite.aspx>)
- Article sur la datation au carbone 14 (CEA) : <http://www.cea.fr/Pages/actualites/sciences-de-la-matiere/carbone-14-carbonate-plombe-synthese-chimique-cosmetiques-antiquite.aspx>
- Animation sur la datation au carbone 14 (CEA) : <http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/datation-carbone-14.aspx>
- Vidéo sur la détermination de la période radioactive : <https://www.youtube.com/watch?v=rawwyIWaHBE>





- Animation du CEA (Les Incollables) sur la datation des roches :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/terre-univers/dater-roches.aspx>
- Animation du CEA « De l'atome à la radioactivité » :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/de-l-atome-a-la-radioactivite.aspx>
- Animation sur la décroissance radioactive (CEA) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/decroissance-radioactive.aspx>
- Serious game sur la datation par radioactivité (PHeT) :
<https://phet.colorado.edu/fr/simulation/radioactive-dating-game>
- Animation sur la radioactivité (CEA) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/radioactivite.aspx>
- Microlearning radioactivité :
<https://www.microlearning-radioactivite.fr/course/radioactivite>
- Simulation de lancer de dés (décroissance radioactive) :
<http://webetab.ac-bordeaux.fr/Pedagogie/Physique/telechargement/phyter/radioactivite/lanceredesdes/index.htm>





Activité 1 : Premières méthodes expérimentales pour déterminer l'âge de la Terre (activité de groupe)

1.1. Généralités

Cette activité permet d'établir une synthèse à partir d'un travail de groupe pour comparer les âges de la Terre obtenus avec différentes méthodes expérimentales.

Elle vise également à analyser les limites de chaque méthode (principalement dues aux moyens techniques disponibles à l'époque de leur mise en œuvre), limites qui n'empêchent pas le progrès scientifique si elles sont prises en compte.

Objectifs notionnels :

- Au cours de l'histoire des sciences, plusieurs arguments ont été utilisés pour aboutir à la connaissance actuelle de l'âge de la Terre : temps de refroidissement, empilements sédimentaires, évolution biologique, radioactivité.

Objectifs méthodologiques :

- Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre ;
- Identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre.

Durée : Cette activité peut s'envisager sur une durée d'1h30.

1.2. Présentation des documents

Document d'appel : Pour rappel, les calculs médiévaux prenaient pour base la création du monde décrite dans la Bible et, à partir des généralogies bibliques et antiques. Ils donnaient un âge de la Terre avoisinant 6 000 ans.

Les scientifiques pressentent à partir du XVIII^e siècle que l'âge de la Terre est bien plus ancien.

1.2.1. Ensemble documentaire Groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce schéma représente de manière simplifiée le cycle de l'eau.
- **Document 2** : Cet extrait de texte d'Hubert Krivine, présente la méthode d'Edmond Halley se basant sur la salinité de l'eau de mer.

Suggestions de questions :

- D'où proviennent les sels minéraux ?
- Pourquoi le modèle utilisant la salinité de l'eau de mer est erroné ?

Sources :

- Document 2 : *Histoire de l'âge de la Terre*, Krivine H., Images de la physique, n°44, CNRS, 2011.



**Ressources complémentaires :**

- Vidéo du cycle de l'eau (source CEA) : <https://www.youtube.com/watch?v=pGfwOC9iyrc>
- C'est pas sorcier *Le sel de la Terre à la mer* :
<https://www.youtube.com/watch?v=ChUai6Wbm78>

1.2.2. Ensemble documentaire Groupe 2

Présentation des documents :

- **Document 3** : Ce document présente la méthode utilisée par Buffon pour déterminer l'âge de la Terre.
- **Document 4** : Ce document décrit la méthode de Buffon en se basant sur l'étude des couches de sédiments.
- **Document 5** : Cette photographie permet d'illustrer la méthode de Buffon.
- **Document 6** : Le tableau regroupe les âges obtenus par différents scientifiques qui ont utilisés les épaisseurs de sédiments.

Suggestions de questions :

- Pouvez-vous réexpliquer ce qu'est la stratigraphie ?
- Dans le document 4, comment aboutit-on à la conclusion qu'il faut 100 000 ans pour former une couche d'un mètre ?
- Quels sont les facteurs qui compliquent la datation de la Terre (par la méthode stratigraphique) ?

Sources :

- Document 3 : *Histoire de l'âge de la Terre*, Krivine H., Images de la physique, n°44, CNRS, 2011.

1.2.3. Ensemble documentaire Groupe 3

Présentation des documents :

- **Document 7** : Ce texte présente les différents scientifiques qui ont permis la construction de la notion d'évolution : Cuvier, Lamarck, Darwin.
- **Document 8** : Cette caricature illustre la vision de l'époque concernant Darwin et sa théorie de l'évolution.
- **Document 9** : La photographie de cette dalle d'ammonites permet d'expliquer un des arguments de Darwin.
- **Document 10** : Le tableau du document 10 résume les arguments avancés par Darwin et Kelvin concernant l'âge estimée de la Terre au XIX^e siècle.



**Suggestions de questions :**

- Quels sont les scientifiques qui mettent en place la théorie de l'évolution des espèces ?
- Quelle preuve Darwin invoque-t-il pour montrer que l'évolution des espèces se fait forcément sur un temps très long ?
- Quelles sont les limites de sa méthode de datation ?

1.2.4. Ensemble documentaire Groupe 4

Présentation des documents :

- **Document 11** : Le texte du document 11 présente la méthode expérimentale de Buffon. En plus de sa méthode s'appuyant sur les couches sédimentaires, il propose d'établir l'âge de la Terre en mesurant le refroidissement de sphère de métal dont la température a été portée à la limite de fusion.
- **Document 12** : Le texte explique les limites auxquelles Buffon s'est heurté. La religion a limité de nombreuses publications et/ou réfuté les résultats obtenus.
- **Document 13** : Le document présente les apports de Kelvin en utilisant l'équation de Fourier. L'âge de la Terre est alors de 20 à 40 millions d'années.

Suggestions de questions :

- Quelle comparaison Buffon fait-il entre les boulets qu'il chauffe et la Terre ?
- Quelles sont les raisons invoquées par le document 12 pour expliquer que Buffon ne publie pas les résultats exacts qu'il trouve ?
- Buffon et Kelvin partent sur une hypothèse fausse : laquelle ? Cela les empêche-t-il de faire avancer la connaissance scientifique ?
- Pour quelle raison Kelvin n'a-t-il pas autant de scrupules que Buffon à publier ses résultats ? Qui s'oppose à lui, à cette époque ?

Source :

- Document 12 : *Buffon et la première approche expérimentale de la mesure du temps*, de Wever P., 2015, Futura-sciences.com.

1.3. Les réponses attendues aux questions

1.

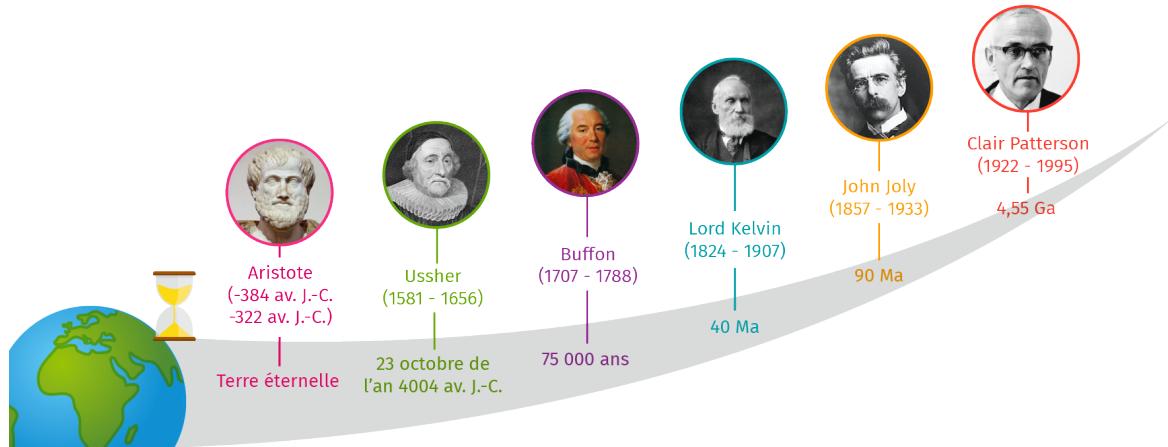
- **Groupe 1** : Halley utilise la salinité de l'eau de mer pour déterminer l'âge de la Terre. Repris par John Joly, l'âge de la Terre obtenue est de 90 Ma. Des erreurs faussent ce modèle : perte de sels par évaporation et dépôts.
- **Groupe 2** : Buffon utilise la vitesse de dépôts des sédiments pour aboutir à la datation de la Terre. L'âge obtenu varie entre quelques dizaines de millions à trois milliards d'années. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les compactations des couches et les pertes



par érosion suivant l'endroit où les mesures sont effectuées.

- **Groupe 3 :** L'étude des fossiles permet à Darwin de définir un âge de la Terre de plusieurs centaines de millions d'années. Il se base sur la notion d'évolution des espèces.
- **Groupe 4 :** Buffon et Kelvin déterminent l'âge de la Terre par des expérimentations sur des boulets chauffés à blanc. Buffon obtient un âge de 75 000 ans. Kelvin, quant à lui, publie un âge de 40 millions d'années.
Cette méthode ne prend pas en compte la chaleur interne de la Terre, liée à la désintégration d'éléments radioactifs, mais dont l'existence était inconnue à l'époque.

2.



3. Une théorie scientifique s'oppose à un dogme du fait de plusieurs caractéristiques. Elle doit :

- Rendre compte des faits observés par l'expérience ;
- Être cohérente avec elle-même ;
- Permettre la prédiction d'autres situations, être la plus simple possible ;
- Pouvoir être remise en cause.

1.4. Les indicateurs de réussite

- 1. La méthode utilisée est décrite, elle explique l'élément mesuré et les paramètres pris en compte. Elle indique l'âge de la Terre obtenu avec cette méthode. Les limites auxquelles cette méthode se heurtent sont décrites, ainsi que les éléments réfutables avancés par les autres scientifiques.
- 2. La présentation est synthétique, elle utilise le vocabulaire scientifique. L'âge de la Terre obtenu est énoncé.
- 3. La frise chronologique comprend un axe fléché et gradué. Elle reprend les éléments de tous les groupes une fois toutes les présentations terminées.
- 4. Éléments d'une théorie scientifique : apporter au moins deux des cinq éléments permettant de définir une théorie scientifique (la théorie doit rendre compte des faits observés par l'expérience, être cohérente avec elle-même, permettre la prédiction d'autres situations, être la plus simple possible, pouvoir être remise en cause).

Activité 2 : Déterminer l'âge de la Terre avec la radioactivité (documentaire)

2.1. Généralités

Cette activité a pour but de déterminer l'âge de la Terre à partir de l'étude de la radioactivité de certains éléments de sa constitution.

Cette technique se base sur l'utilisation des isotopes U-Pb et mise au point par Clair Patterson.

Liens au programme :

Au cours de l'histoire des sciences, plusieurs arguments ont été utilisés pour aboutir à la connaissance actuelle de l'âge de la Terre : temps de refroidissement, empilements sédimentaires, évolution biologique, radioactivité.

L'âge de la Terre aujourd'hui précisément déterminé est de $4,57 \times 10^9$ ans.

Durée : Une durée de 45 min peut être envisagée pour cette activité.

2.2. Présentation des documents

- **Document 1** : Le graphique et le texte associé permettent d'expliquer l'évolution d'un système radioactif au cours du temps. Le nombre d'*éléments pères* décroît au cours du temps, transformés en *éléments fils*.
- **Document 2** : Patterson utilise le système U-Pb, sa très grande période radioactive permettant de dater les objets terrestres les plus anciens.
- **Document 3** : La photographie présente une météorite ferreuse, la sidérite. Ces météorites sont utilisées pour la datation. Leur composition est similaire à celle du noyau terrestre.
- **Document 4** : Le graphique Pb/Pb montre la droite isochrone obtenue par Patterson en se basant sur des météorites ferreuses et pierreuses afin de déterminer l'âge de la Terre.
- **Documents 5 et 6** : Cette photographie d'un zircon en micrographie en fausses couleurs permet de visualiser les différentes croissances de ce minéral. Le centre étant la partie la plus ancienne et l'extérieur la plus récente. Successivement pris dans les orogenèses (formation des montagnes), il est possible d'obtenir un âge via la méthode U-Th-Pb.
L'âge le plus ancien pour une roche terrestre est de 4,4 milliards d'années.

Ressources complémentaires :

- Vidéo sur la détermination de la période radioactive :
<https://www.youtube.com/watch?v=rawwyIWaHBE>
- Animation sur la décroissance radioactive (CEA) :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/decroissance-radioactive.aspx>



2.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Un système (élément père - élément fils) peut être qualifié de chronomètre radioactif car au cours du temps, les éléments pères sont désintégrés en éléments fils. En mesurant le nombre d'éléments pères et fils à un instant donné, il est possible de connaître la durée qui s'est écoulée au cours du processus de désintégration.

Question 2 : Patterson a pu procéder de la manière suivante pour mesurer l'âge de la Terre :

- Récolte de météorites ;
- Mesure des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$;
- Calcul du coefficient directeur de la droite isochrone grâce auquel on peut déterminer après calcul l'âge de la Terre.

Question 3 : Des météorites parviennent régulièrement sur Terre. Certaines sont issues de la formation du système solaire et n'ont pas participé à la formation d'une planète.

Stables, elles contiennent des éléments d'un âge similaire à celui de la formation de la Terre. L'âge des météorites étudiées correspond à celui des minéraux terrestres les plus anciens, dont le zircon.

Activité 3 (numérique) : activité documentaire

3.1. Généralités

L'objectif premier de cette activité est d'aborder la distinction entre une question scientifique et une question métaphysique, en prenant pour support la détermination de l'âge de la Terre qui s'y prête particulièrement bien, en particulier par une approche historique.

On cherche également à apporter aux élèves d'autres points de vue que le sempiternel « obscurantisme de l'Église catholique », souvent décrié sans élément de contextualisation, ce qui affaiblit en réalité les arguments scientifiques aux yeux des élèves. À travers l'approche grecque par exemple, on se rend compte que d'autres penseurs ont proposé des paradigmes (représentations de l'Univers) incompatibles avec les avancées actuelles.

La question peut paraître délicate à aborder en classe car les élèves vont dévier, consciemment ou non, vers la question religieuse (émergence des croyances personnelles, qui sont en réalité davantage des attachements culturels fortement ancrés). En réalité, cela peut se révéler très riche si le professeur parvient à faire saisir aux élèves à quel moment telle remarque sort du champ scientifique - ce qui arrive très régulièrement dans les médias ou les articles de vulgarisation.

Lien au programme :

Identifier diverses théories impliquées dans la controverse de l'âge de la Terre

Durée : 1 heure.

3.2. Présentation des documents

Document d'appel : Ce document permet de rappeler que la question de l'âge de la Terre (donc des origines) est centrale depuis longtemps, même à des époques qui ne disposaient daucun moyen pour expérimenter sur la question.

3.2.1. Ensemble documentaire A

Présentation des documents :

Les quatre premiers documents présentent plusieurs visions de la création de l'Univers, donc de la Terre, issus des cultures antiques les plus proches de notre culture actuelle.

Les documents suivants permettent de faire la distinction entre physique et métaphysique, donc entre une question scientifique et une question qui n'est pas scientifique.

L'objectif étant de comprendre cette distinction avant de reprendre l'analyse des premiers documents et de se faire une opinion sur les paradigmes antiques.

- **Document 1** : Deux écoles de pensée antique sont présentées, les deux proposant une Terre éternelle. La dernière phrase montre que cette pensée a eu cours au Moyen-âge, bien qu'elle soit en contradiction avec le récit mythologique de la Création présenté dans la Bible.
- **Document 2** : L'iconographie présentée est chrétienne, mais le récit biblique est commun aux trois grandes religions monothéistes. La légende du document permet de réaliser que la plupart des autres religions anciennes véhiculent les récits d'une Terre créée (donc pas éternelle, contrairement au document 1).
- **Document 3** : Arbre généalogique utilisant les récits mythologiques et les récits historiques consignés dans la bible. À mettre en relation avec le document 4.
- **Document 4** : Ussher est le plus célèbre, mais certes pas le seul à se pencher sur un calcul permettant de dater la Terre. Les savants de cette époque utilisent les sources dont ils disposent, sans toujours réaliser que certaines ne sont pas fiables, ou relèvent de la mythologie.
- **Document 5** : Ce document est central dans l'activité, au sens où il précise la distinction entre deux domaines de la connaissance, physique et métaphysique. Distinction fondamentale dans toute l'histoire de la pensée occidentale, et dont l'ignorance mène à tous les conflits entre « science » et « religion », en particulier dans la société actuelle.
- **Document 6** : Document d'illustration.
- **Document 7** : Ce document permet de comprendre que des questions métaphysiques peuvent devenir des questions scientifiques si les progrès techniques permettent d'expérimenter pour répondre à la question posée.
- **Document 8** : Ce document peut surprendre car il va à l'encontre de l'image d'Épinal opposant Galilée à l'Église. Galilée met en doute la lecture littérale de la Bible, qui amène à une fausse croyance. Il ne met pas en doute la croyance en un dieu (c'est une question que la science ne peut trancher !)

3.3. Pistes d'exploitation : réponses attendues

Question 1 : Les datations proposées par les philosophes grecs ne pouvaient pas être fondées sur une démarche scientifique expérimentale, car ils ne disposaient d'aucun moyen technique pour expérimenter. Les propositions qu'ils font sont philosophiques : ils proposent une théorie que personne n'est capable de tester expérimentalement, mais qui leur permet d'expliquer le monde qui les entoure.

Question 2 : L'âge d'environ 6 000 ans pour la Terre n'est pas une croyance au sens où il n'est pas inscrit dans un quelconque texte fondateur d'une religion. Il est issu de recherches historiques

complexes comme celles d'Ussher, qui se base pourtant sur une croyance, la croyance que le récit de la création de la Terre dans la Bible (et le Coran, et la Torah) relate littéralement la réalité. C'est l'erreur qu'il commet dès le départ.

Question 3 : Exemples de questions de nature scientifique (tout ce qui peut être testé, expérimenté) : Comment se fait la digestion ? Comment se forment les cernes des arbres ? Pourquoi la mer est-elle salée ?

Exemples de questions de nature métaphysique (tout ce qui ne peut pas (encore) être testé) : Y a-t-il une vie après la mort ? Existe-t-il des extraterrestres hostiles dans l'Univers ?

Question 4 : La question de l'âge de la Terre était autrefois une question métaphysique, à laquelle la science ne pouvait pas apporter de réponse faute de moyens techniques. Les seules réponses possibles étaient métaphysiques (donc apportées par les religions ou les philosophies). Les progrès de la technique en font aujourd'hui une question scientifique.

Question 5 : Une croyance culturelle est souvent difficile à abandonner car il faut aller à contre-courant de toute une société, bouleverser les idées établies, oser proposer une autre vision que celle qu'on a toujours connue.

Question 6 : La synthèse devrait permettre de dégager quelques points essentiels :

- Science et croyance ne s'opposent pas car elles doivent travailler sur des questions différentes. Donc si elles s'opposent sur une question, c'est que la science ou la croyance est sortie de son domaine d'étude. Par exemple, si aujourd'hui une philosophie continue de proclamer que la Terre est éternelle, elle se prononce sur une question qui n'est plus de son ressort ;
- La science s'appuie sur l'expérience, elle ne peut pas s'appuyer sur une croyance. En revanche, elle peut tester cette croyance ;
- Les croyances ne peuvent pas ignorer les progrès scientifiques si elles veulent continuer d'expliquer le monde. Ainsi, les religions qui croyaient, à travers une lecture littérale des textes anciens, que la Terre avait 6000 ans, ont dû revoir leur lecture de ces textes et convenir qu'il s'agissait de récits mythologiques, de contes.

Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Estimer l'âge de la Terre par la stratigraphie

Compétence principalement travaillée : Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre ; identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre.

Correction :

1. En additionnant les épaisseurs de toutes les couches sédimentaires données dans le document, on établit que la couche de porphyre est surmontée de 8,40 m de sédiments, soit 8 400 mm. À raison de 0,1 mm/an, il a donc fallu 84 000 ans pour former l'ensemble des couches stratigraphiques.

2. On peut donc conclure que la Terre est âgée de plus de 84 000 ans ; la couche de roche magmatique (le porphyre) s'est formée avant les couches sédimentaires qui la recouvrent.



3. Cette estimation est limitée par plusieurs approximations :

- L'érosion qui a eu lieu entre la formation des différentes couches n'est pas prise en compte ;
- Il n'est pas fait mention de la compression que subissent les couches sédimentaires lors de leur recouvrement par de nouvelles couches ;
- La vitesse de sédimentation a été considérée comme uniforme, ce qui n'est sans doute pas le cas, on a pris une vitesse de sédimentation à proximité des côtes atlantiques, dont la valeur est sans doute légèrement différente de la vitesse (ou plutôt, DES vitesses) de sédimentation réelle.

Exercice 2 : L'origine de la salinité des océans selon Halley

Compétence principalement travaillée : Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre ; identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre.

Correction :

1. D'après Halley, le sel est apporté par les rivières, qui transportent les minéraux arrachés aux roches qu'elles ont traversées. L'eau s'évapore ensuite, laissant dans l'océan les minéraux ainsi apportés. La salinité totale est donc en constante augmentation, d'après cette hypothèse.

2. Dans un cas général, un lac n'est pas le dernier bassin dans lequel l'eau se déverse, contrairement aux mers et océans. Lors du cycle de l'eau, les apports en sels minéraux ne s'y accumulent donc pas comme dans les mers et océans. Par ailleurs, les réservoirs d'eau que représentent les lacs ont une existence plus récente que celle des bassins océaniques.

3. On cherche à calculer la durée nécessaire à obtenir la concentration actuelle en sel dans les océans.

$$t = \frac{M}{m}$$

En notant t cette durée, et M la masse actuelle de sel dans l'océan, on peut écrire $t = \frac{\gamma \cdot V}{m}$ et donc

$$t = \frac{\gamma \cdot V}{m}.$$

4.2. Le repaire des initiés

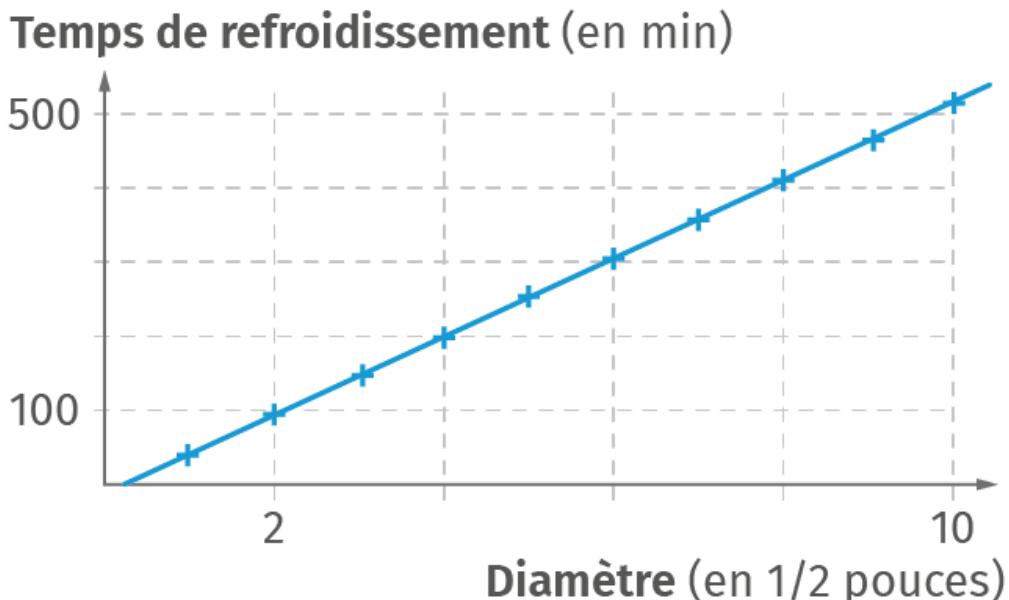
Exercice 3 : Buffon et le refroidissement des sphères

Compétence principalement travaillée : Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre ; identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre.

Correction :

1 et 2.





3. L'équation de la droite est $t = 53,6 \times N - 16,1$, ce qui est proche des résultats donnés par Buffon ($t = 54xN-15$). On note, comme Buffon, « N » le diamètre de demi-pouces de la sphère.

4. En considérant le diamètre de la Terre

$D_{Terre} = 941\,461\,920 \text{ demi-pouces}$ proposé dans le document, on aboutit à :
 $t_{Terre} = 53,6 \times 941\,461\,920 - 16,1 = 5,05 \times 10^{10} \text{ min} = 9,6 \times 10^4 \text{ ans}$, soit donc 96 000 ans environ.

5. Buffon utilise des sphères homogènes (de différents matériaux, certes, mais chacune étant homogène), ce qui n'est pas le cas de la Terre. Ses sphères sont relativement petites comparées à la Terre, il y a donc un côté hasardeux à extrapoler ses résultats (avec une précision au jour près dans son texte !).

On sait par ailleurs aujourd'hui que la chaleur de la Terre provient des réactions nucléaires au sein de son noyau, sa température n'est pas un reliquat de sa formation : Buffon fonde donc son raisonnement sur une hypothèse entièrement fausse.

Cependant, sa tentative est la première expérimentation scientifique tentant de dater la Terre, ce qui est un progrès puisqu'aucun savant avant lui n'avait pu tester les théories qui avaient cours.

Exercice 4 : La datation de Lucy

Compétence principalement travaillée : Résoudre une équation.

Correction :

$$t = \frac{(^{40}\text{Ar})}{0,105 \times (^{40}\text{K}) \cdot \lambda}$$

1. L'expression de t est :

$$t_1 = \frac{4,34 \times 10^{10}}{0,105 \times 19,9 \times 10^{13} \times 5,54 \times 10^{-10}} = 3,75 \times 10^6 \text{ ans}$$

2. Pour la coulée basaltique,
soit 3,75 millions d'années.



$$t_2 = \frac{4,34 \times 10^{10}}{0,105 \times 20,1 \times 10^{13} \times 5,54 \times 10^{-10}} = 2,80 \times 10^6 \text{ ans}$$

Pour les cendres volcaniques,
soit 2,80 millions d'années.

3. Le squelette de Lucy est pris dans une couche sédimentaire qui s'est formée après la coulée basaltique, et avant la couche de cendres volcaniques. Il date donc d'une époque comprise entre 3,75 et 2,80 millions d'années.

4.3. Le coin des experts

(Guide de résolution pour l'élève présent dans la partie « corrigés » du manuel)

Exercice 5 : La méthode de John Joly

Compétence principalement travaillée : Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre ; identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre.

Correction :

1. En considérant les océans comme un parallélépipède rectangle, leur volume total V est le produit de leur surface S par leur profondeur p :

$$V = S \cdot p = 360 \times 10^6 \times 3,797 = 137 \times 10^7 \text{ km}^3$$

2. La masse d'ions sodium contenue dans les océans, notée m , se déduit de la masse totale des océans M_T , de leur masse volumique μ et de la proportion de sodium dans l'océan (1,07 %) :

$$m = 1,07\% \times M_T = 1,07\% \times \mu \cdot V = \frac{1,07}{100} \times 1,030 \times 10^9 \times 137 \times 10^7 = 1,51 \times 10^{16} \text{ t}$$

3. La masse d'ions sodium annuellement apportés par les rivières à l'océan, notée m' , se déduit de la concentration en ions sodium dans les rivières c , et du volume d'eau apporté chaque année par les rivières à l'océan, V' :

$$m' = c \cdot V' = 5\,250 \times 2,72 \times 10^4 = 1,43 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{an}^{-1}$$

soit 143 millions de tonnes d'ions sodium apportés chaque année par les rivières.

4. Selon cette méthode, il faut considérer qu'à l'origine, les océans n'étaient pas salés du tout. Soit donc

T la durée nécessaire à atteindre la masse m de sodium total :

$$T = \frac{m}{m'} = \frac{1,51 \times 10^{16}}{1,43 \times 10^8} = 1,06 \times 10^8 \text{ ans}$$

Selon cette méthode, le sel s'accumule dans les océans depuis 106 millions d'années. La Terre serait donc âgée d'au moins 106 millions d'années.



5. Le résultat est loin de l'âge connu aujourd'hui car le raisonnement est entaché de plusieurs approximations. Tout d'abord, on considère que la formation des océans est concomitante avec celle de la Terre, ce qui n'est pas le cas. Ensuite, on considère que le sel s'accumule depuis la création des océans, mais là aussi c'est une hypothèse qu'on sait fausse aujourd'hui. En effet, la salinité des océans est en réalité relativement constante au cours des temps entre autres car les ions sodium constituent une partie des sédiments qui se déposent au fond de l'océan, les apports étant ainsi compensées par les pertes.

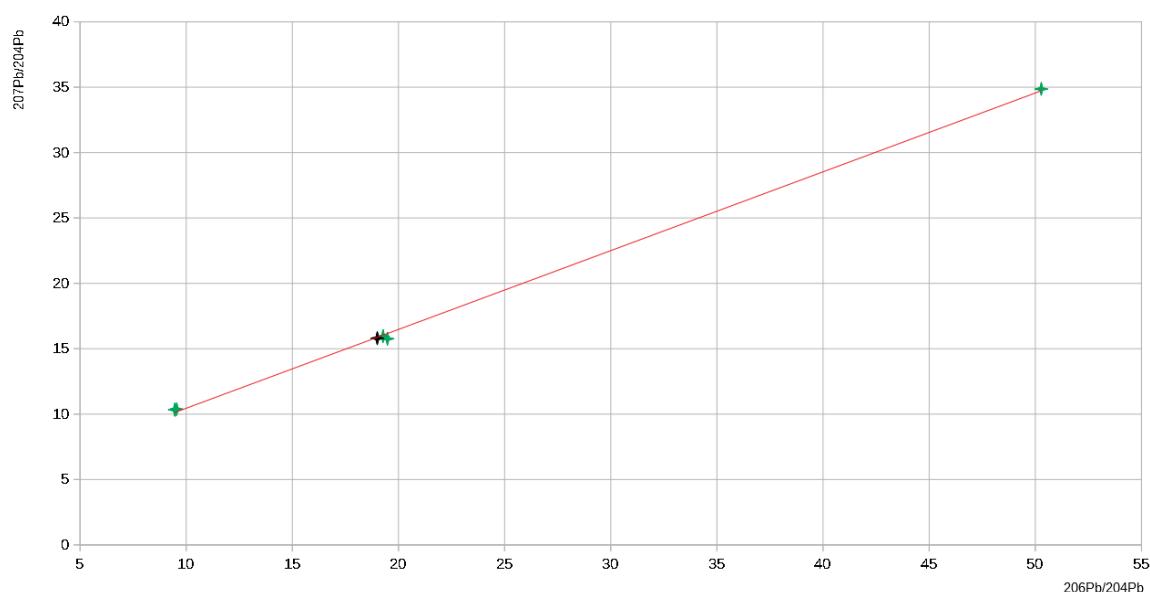
Exercice 6 : La mise en œuvre de la méthode de Clair Patterson

Compétence principalement travaillée : Utiliser des outils mathématiques et informatiques pour reproduire une méthode historique de datation.

Correction :

1 et 2.

Courbe représentative des rapports isotopiques du plomb



3. Le dernier point (en noir) semble aligné avec les autres. On peut en déduire que ces roches terrestres ont sensiblement le même âge que les météorites, donc que la Terre et les météorites étudiées sont des systèmes cogénétiques.

Exercice numérique supplémentaire :

Bientôt disponible.



Livre du professeur

Enseignement scientifique 1re

Chapitre 10 : La Terre dans l'Univers

Introduction

Présentation

Le chapitre est divisé en deux parties :

- Histoire des sciences : un cheminement des premières observations du ciel vers l'acceptation du modèle héliocentrique.
- Astronomie : une étude des phases de la Lune et des modèles géocentrique et héliocentrique.

L'objectif principal de ce chapitre est de développer l'esprit critique des élèves au travers de l'étude des différents modèles et théories qui se sont succédés dans l'histoire de l'astronomie.

Ce chapitre repose sur une contextualisation historique des représentations de la Terre dans l'Univers, en proposant d'analyser par une approche scientifique les modèles qui se sont succédés. En ce sens, l'élève sera donc invité dès que possible à exploiter des observations astronomiques mises à sa disposition pour en extraire les informations qui corroborent ou *a contrario* qui mettent en défaut un modèle donné.

Ce qui a été enseigné au cours des années précédentes

- La plupart des connaissances et capacités concernant la place de la Terre ont été abordées au cycle 3 en Sciences et Technologie puis au cycle 4 en SVT (et en Physique-Chimie dans une moindre mesure) :
 - La place de la Terre au sein du système solaire.
 - Les mouvements de la Terre (notamment la rotation de la Terre sur elle-même).
 - L'apprentissage de ces connaissances a souvent été accompagné d'observations de la voûte céleste : la connaissance des phases de la lune et l'observation d'éclipses, sans être explicitement au programme sont suggérés dans les pistes d'activité.
- En Seconde, les connaissances de mécanique nécessaire à l'interprétation du mouvement des astres sont développées :
 - Description du mouvement.
 - Travail sur la force gravitationnelle.
 - Principe d'inertie.



Bibliographie

- *Histoire de l'astronomie moderne Tome 1*, Jean-Baptiste Delambre (1821).
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9642249x>.
- *Histoire mondiale des sciences*, Colin Ronan, Seuil (1999).
- *L'histoire des sciences pour les nuls*, Vincent Julien, First (2009).
- *Histoire des sciences*, coordonné par Georges Barthélémy, Ellipses (2009).
- *Histoire des sciences de l'Antiquité à nos jours*, sous la direction de Philippe de la Cotardière, Tallandier (2012).
- *Galilée*, Ludovico Geymonat, Seuil (1992).
- *Une belle histoire du temps*, Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, Flammarion (2005).
- *Une brève histoire du temps*, Stephen Hawking, J'ai lu (2007).
- *Les fondateurs de l'astronomie moderne*, Joseph Bertrand (XIX^e) :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9635292k/f9>.
- *Astronomie - Astrophysique*, Agnès Acker, Dunod (5^e édition, 2013).
- *Une histoire de la science arabe*, Ahmed Djebbar, Seuil (2001).
- *Histoire des sciences arabes - Astronomie, théorique et appliquée*, sous la direction de Roshdi Rashed, Le Seuil (2003).

Sitographie

- Deux excellentissimes vidéos décrivant l'articulation entre théorie et expérience :
 - Monsieur Phi : La théorie peut-elle réfuter l'expérience ? | Grain de philo #22
<https://www.youtube.com/watch?v=SXLHijQeYok&feature=youtu.be>.
 - Monsieur Phi : Merci Captain Ad Hoc ! | Grain de philo #23
<https://www.youtube.com/watch?v=meNQnNqHjes>.
- Dossier Esprit sorcier sur la démarche scientifique :
<https://www.espritsorcier.org/dossier-semaine/la-demarche-scientifique/>.
- Présentation d'une démarche scientifique dans un tout autre domaine par la youtubeuse Scilabus :
<https://www.youtube.com/watch?v=P2oSxXyNSiw>.

Idées d'activités alternatives ou complémentaires

- Recherches historiques sur les acteurs présentés : Pythagore, Aristote, Ptolémée, Copernic, Galilée, Newton, etc.
- Recherches historiques sur les développements en astronomie de différentes civilisations (Égypte, Chine, Inde, monde arabe ...) : techniques d'observations, observations réalisées, enjeux du développement de l'astronomie (religieux, repère de temps et d'espace, prédiction de l'avenir, etc.)
- Observations sur Stellarium :





- les étoiles “errantes” (les planètes) qui se déplacent sur le fond des constellations (pointer vers Mars, puis faire défiler les jours et observer le déplacement de Mars par rapport aux constellations) ;
 - des étoiles se déplaçant plus ou moins vite (presque immobile pour l'étoile polaire) ;
 - le décalage progressif de la rotation du ciel nocturne d'une nuit à l'autre, qui change en cycles d'une année ;
 - le cycle lunaire ;
- Recherches historiques sur les instruments de mesures utilisés en astronomie, comme le quadrant, l'astrolab, la lunette astronomique, le télescope, etc.
 - Recherches historiques sur l'intérêt des recherches astronomiques pour se repérer dans le temps (calendrier) et dans l'espace (navigation, religion).
 - Description des éclipses.

Sommaire

- **Activité 1 - activité de groupes** - La Terre au centre ? p. 164.
- **Activité 2** - Du modèle géocentrique au modèle héliocentrique p. 166.
- **Activité 3** - L'apparence de la Lune p. 168.

Activité 1 : La Terre au centre ? (activité de groupes)

1.1. Généralités

Les deux objectifs principaux de cette activité sont :

- Historique : décrire l'évolution des théories sur la place de la Terre parmi les astres observables avant Copernic.
- Démarche scientifique : analyser l'élaboration des modèles de l'Univers à partir des observations réalisables à l'époque.

L'objectif étant que les élèves se mettent à la place de quelques penseurs et savants notoires, et comprennent la pertinence d'un modèle en fonction des observations réalisables à une époque particulière. Il serait intéressant que les élèves effectuent eux-mêmes certaines observations, directement ou à l'aide du logiciel Stellarium.

Savoirs :

- Le passage d'une conception géocentrique à une conception héliocentrique constitue l'une des controverses majeures de l'histoire des sciences.

Savoir-faire :

- Interpréter des documents présentant des arguments historiques pour discuter la théorie héliocentrique.





Cette activité décrit de manière succincte les principales observations réalisées avant l'utilisation de la lunette astronomique, ainsi que les théories élaborées par les scientifiques philosophes de l'Antiquité et du Moyen-Âge.

Du point de vue des compétences, les élèves travaillent ici sur de l'appropriation de documents, doivent extraire les informations pertinentes et les comprendre, mettre en parallèle les observations et les théories.

Durée : 40 minutes.

1.2. Présentation des documents

1.2.1. Groupe 1

Présentation des documents :

- Document 1 : présentation des premières observations et première distinction entre les étoiles et les planètes. On peut ajouter la notion de constellation utilisée comme référentiel afin de pouvoir repérer le mouvement des astres.
- Documents 2 et 3 : description des modèles créés par Pythagore, Platon et Aristote.

Sources :

- Article "Planètes" : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/planetes/>.
- *Les instruments de l'astronomie ancienne*, Philippe Dutarte, Vuibert (2006).

Ressources complémentaires :

- Traduction du *Traité du ciel* d'Aristote (1866) :
<http://remacle.org/bloodwolf/philothes/Aristote/tableciel.htm>

1.2.2. Groupe 2

Présentation des documents :

- Document 4 : mise en évidence des observations sources de problème pour les modèles géocentriques.
- Documents 5 et 7 : description des solutions trouvées par Eudoxe, Ptolémée et Aristote pour adapter le modèle géocentrique aux observations.
- Document 6 : première ébauche connue d'un modèle héliocentrique.

Sources :

- *Les instruments de l'astronomie ancienne*, Philippe Dutarte, Vuibert (2006).

Document sous licence libre Creative Commons



**Ressources complémentaires :**

- Traduction de l'Almageste de Ptolémée (tomes 1 et 2) :
 - <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k64767c/f1.image>.
 - <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k61815p>.

1.3. Indicateurs de réussite

- **Groupe 1 :**

Dans le référentiel terrestre, nous observons le Soleil et la Lune tourner autour de la Terre. Nous observons des planètes en mouvement par rapport à la sphère des étoiles, repérée grâce aux constellations.

- Pythagore : La Terre est située au centre du cosmos et autour d'elle tournent des sphères portant les planètes.
- Platon : Le monde est divisé en deux parties que sont la sphère des étoiles et les sept cercles pour les sept planètes en rotation autour de la Terre.
- Aristote : Une sphère ultime fait tourner les étoiles, il n'y rien au-delà. Le cosmos est divisé entre le monde sublunaire en mouvement et le monde supralunaire immuable.

- **Groupe 2 :**

Plusieurs points s'expliquent difficilement avec le modèle géocentrique :

- les rétrogradations de Mars et les stations de Saturne ;
- la précession des équinoxes ;
- la variation de l'éclat des planètes ;
- la variation de l'axe de rotation du monde.

Philolaos effectue une ébauche de modèle héliocentrique.

Eudoxe de Cnide élabore un modèle basé sur des sphères emboîtées les unes dans les autres, chacune expliquant une partie des mouvements observés.

Ptolémée établit des modèles géométriques en utilisant l'équant et des épicycles.

Remarque : l'équant a été conceptualisé pour rendre compte des mouvements non réguliers observés depuis la Terre, comme celui de la rétrogradation de Mars par exemple. Ptolémée a excentré le point à partir duquel la vitesse angulaire de l'astre devient constante. Il serait peut-être intéressant de décrire la notion de vitesse angulaire, notamment pour les élèves les moins intuitifs.

1.4. Éléments différenciant permettant d'aider les élèves

- **Groupe 1 :**



La première difficulté à l'identification des différents modèles proposés par Pythagore, Platon et Aristote est de bien comprendre les observations de ces scientifiques.

| | |
|--------------------------|--|
| Coup de pouce n°1 | Identifier les objets que les scientifiques de l'Antiquité voyaient comme étant fixes et ceux qu'ils voyaient comme étant mobiles. |
| Coup de pouce n°2 | Les scientifiques considéraient les étoiles comme fixes sur la voûte céleste, elle-même en rotation autour de la Terre. |

- **Groupe 2 :**

| | |
|--------------------------|--|
| Coup de pouce n°1 | Les limites du modèle géocentrique sont listées dans le document 1. |
| Coup de pouce n°2 | Identifier les éléments différents entre le "simple" modèle héliocentrique et les modèles développés pour expliquer les limites du modèle. |

Activité 2 : Du modèle géocentrique au modèle héliocentrique

2.1. Généralités

Cette activité vise à montrer quelques controverses liées au modèle héliocentrique :

- Comment ce modèle est-il apparu ?
- Pourquoi n'a-t-il pas été accepté de manière générale immédiatement ?
- Quelles observations et quelles théories ont permis son adoption ?

Savoirs :

- Observée dans un référentiel fixe par rapport aux étoiles, la Terre parcourt une trajectoire quasi circulaire autour du Soleil.
- Le passage d'une conception géocentrique à une conception héliocentrique constitue l'une des controverses majeures de l'histoire des sciences.
- Interpréter des documents présentant des arguments historiques pour discuter la théorie héliocentrique.

Cette activité présente les avancées majeures pour l'acceptation du modèle héliocentrique, de la description de ce modèle par Copernic vers son acceptation grâce au principe d'inertie de Galilée et des lois de Newton.



Il s'agit ici de comprendre le cheminement qui a eu lieu à l'époque, les discussions, les arguments en faveur et les arguments contre ce modèle.

Durée : 40 minutes.

2.2. Présentation des documents

2.2.1. Ensemble documentaire A

Présentation des documents :

Les documents présentent un à un les modèles établis par les principaux acteurs du modèle héliocentrique :

- Copernic pour le premier jet.
- Tycho Brahé pour une adaptation du modèle héliocentrique de Copernic.
- Galilée pour la résolution théorique du principal problème du modèle héliocentrique (si la Terre est en mouvement, pourquoi ne le sentons-nous pas ?).
- Newton pour une confirmation du modèle s'appuyant sur une loi mathématique.

Le dernier document présente succinctement l'évolution des techniques d'observations.

Sources :

- *Histoire de l'astronomie moderne Tome 1*, Jean-Baptiste Delambre (1821).
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9642249x>.
- *Galilée*, Ludovico Geymonat, Seuil (1992).
- *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Copernic.
http://classiques.uqac.ca/collection_sciences_nature/copernic_nicolas/revolutions/revolutions_orbes_celestes.html
http://www.blld.fr/ProductDocumentation/9782251345147_0.pdf
- *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Isaac Newton (1759), traduction d'Émilie du Châtelet. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k29037w/f1.item>

Ressources complémentaires :

- Vidéo de Monsieur Phi : La théorie peut-elle réfuter l'expérience ? | Grain de philo #22
<https://www.youtube.com/watch?v=SXLHijQeYok&feature=youtu.be>

2.2.2. Réponses attendues aux questions

1. Le modèle héliocentrique de Copernic simplifie les trajectoires des planètes, mais implique des grands espaces vides, et met la Terre en mouvement alors que nous n'en ressentons pas les effets.

2. En défaveur du modèle d'Aristote : l'Univers n'est pas immuable car il a observé une comète, ainsi qu'une supernova.

En défaveur du modèle de Copernic : présence de grands espaces vides et mouvement de la Terre.





3. Galilée utilise pour la première fois un instrument grossissant, qui lui permet donc d'observer des détails inobservables jusqu'alors.
4. Galilée établit le principe d'inertie. Nous ne ressentons pas les effets du mouvement de la Terre car nous accompagnons ce mouvement.
5. Isaac Newton établit trois lois mathématiques fondamentales pour la mécanique et les applique au système solaire.
6. Aujourd'hui, nous utilisons des lunettes astronomiques, des télescopes sur Terre, un télescope en orbite autour de la Terre (Hubble) et des sondes envoyées au-delà de notre atmosphère.

7.

- Copernic : description du modèle héliocentrique afin de simplifier les trajectoires des astres en mouvement.
- Tycho Brahé : remise en question du modèle d'Aristote où l'Univers est immuable.
Élaboration de son modèle "géo-héliocentrique".
- Galilée : établissement du principe d'inertie, qui résout les problèmes liés au mouvement de la Terre.
- Newton : utilisation du modèle héliocentrique pour la mise en équation des trajectoires des astres en mouvements.

Activité 3 : L'apparence de la Lune

3.1. Généralités

L'activité a pour objectif de faire connaître le mouvement de la Lune dans le référentiel géocentrique ainsi que de faire comprendre et connaître les phases de la Lune.

Savoirs :

- Observée dans un référentiel géocentrique, la Lune tourne autour de la Terre sur une trajectoire quasi-circulaire. Elle présente un aspect qui varie au cours de cette rotation (phases).
- Interpréter l'aspect de la Lune dans le ciel en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil.

Durée : 40 minutes.

3.2. Présentation des documents

- Document 1 : un exemple de calendrier lunaire qui présente les différentes apparences de la Lune observées depuis la Terre au cours de l'année 2019.
Description du mouvement de la Lune dans le référentiel géocentrique.
- Document 2 : une schématisation du système Terre-Lune-Soleil.

Document sous licence libre Creative Commons





- Document 3 : une brève explication du phénomène des marées.
- Document 4 : une représentation des phases de la Lune, associées à leurs noms. Un protocole d'une expérience à mettre en place pour visualiser les phases de la Lune.

3.3. Les réponses attendues aux questions

1. D'après le calendrier, la période apparente de révolution de la Lune autour de la Terre est entre 29 et 30 jours. Cette période est supérieure à la période de révolution sidérale de 27,3 jours.

2. La Terre met 365,25 jours pour effectuer une révolution complète autour du Soleil.

Durant cette période, la Terre parcourt $2\pi R = 2 \times \pi \times 384400 = 241\,526\text{ km}$.

La Lune effectue 12 rotations autour de la Terre au cours d'une période de révolution de la Terre

autour du Soleil, donc la Terre parcourt $\frac{241526}{12} = 20\,127\text{ km}$ pendant une révolution de la Lune autour de la Terre.

La période apparente de révolution de la Lune autour de la Terre est différente de sa période sidérale car la Terre effectue un déplacement non négligeable de 20 127 km en une période, ce qui influe sur l'apparence de la Lune vue depuis la Terre.

3. De manière générale, une moitié de la Lune est éclairée par le Soleil (sauf lors des éclipses). Cependant, la partie de Lune éclairée visible depuis la Terre varie en fonction des positions combinées de la Terre autour du Soleil et de la Lune autour de la Terre.

- Si la Lune est située derrière nous par rapport au Soleil, alors nous observerons une pleine Lune.
- Si la Lune est située entre nous et le Soleil, alors nous observerons une nouvelle Lune.

De plus, il est important de noter la variété des apparences de la Lune partiellement éclairée, appelées croissant, quartier ou gibbeuse, suivant la forme géométrique formée par la lumière du Soleil sur la Lune.

4. La Lune tourne autour de la Terre en 27,3 jours et la Terre tourne autour du Soleil en 365,25 jours. La Lune est éclairée par le Soleil, la zone éclairée apparaît blanche mais évolue car l'angle de vue de cette zone éclairée évolue en fonction des positions relatives de la Lune, de la Terre et du Soleil.

Exercices

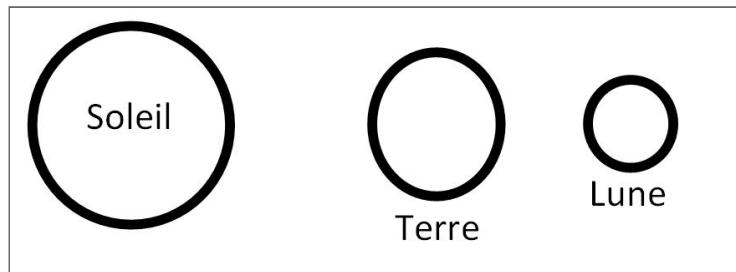
4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1

Compétence principalement travaillée : interpréter l'aspect de la Lune dans le ciel en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil.

Correction :

1. La Terre cache les rayons du Soleil qui normalement arrivent jusqu'à la Lune.



2. Lors d'une éclipse de Lune, celle-ci se situe en pleine Lune. En effet, elle est située derrière la Terre par rapport au Soleil.

Exercice 2

Compétence principalement travaillée : interpréter des arguments historiques pour discuter de la théorie héliocentrique.

Correction :

Il n'y a pas de différence de portée vers l'ouest ou vers l'est car la vitesse relative du boulet de canon par rapport au point de lancer ne change pas selon la direction du tir.

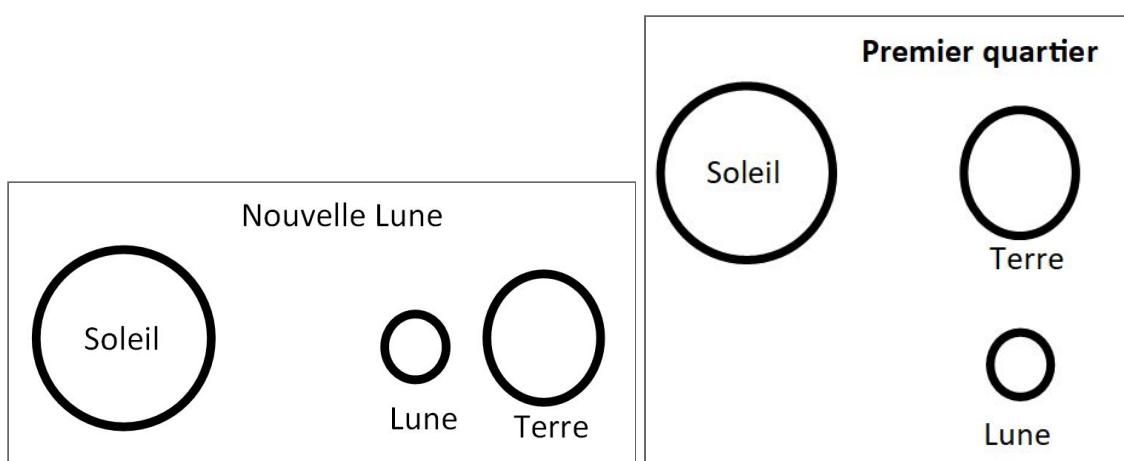
La relativité du mouvement a été mise en évidence par Galilée et se retrouve dans le principe d'inertie.

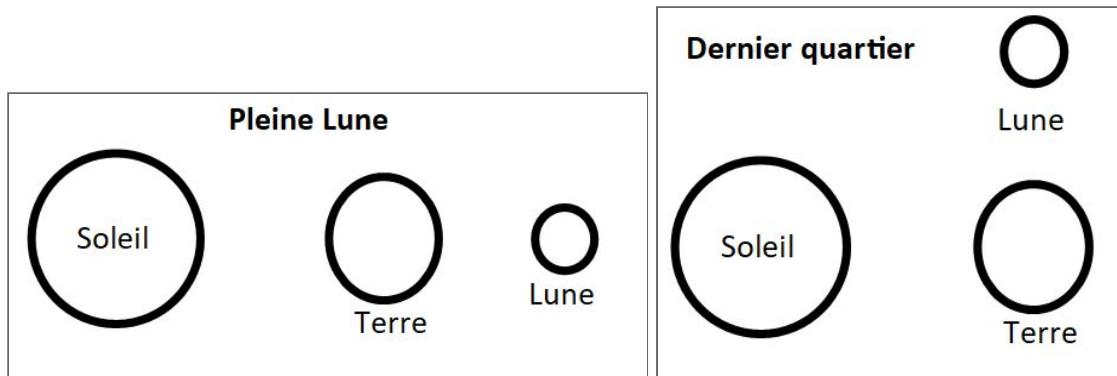
Exercice 3

Compétence principalement travaillée : interpréter l'aspect de la Lune dans le ciel en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil.

Correction :

Dans les cas de la nouvelle Lune et de la pleine Lune, l'alignement apparent qui est présenté sur le schéma ne tient pas compte du fait que la Lune n'est pas dans le plan de l'écliptique, sans quoi on serait dans la situation d'une éclipse.





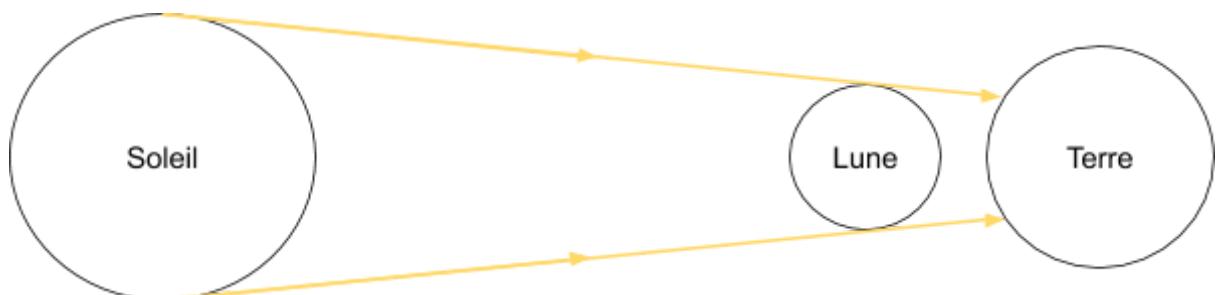
4.2. Le repaire des initiés

Exercice 4

Compétence principalement travaillée : interpréter l'aspect de la Lune dans le ciel en fonction de sa position par rapport à la Terre et au Soleil.

Correction :

1.

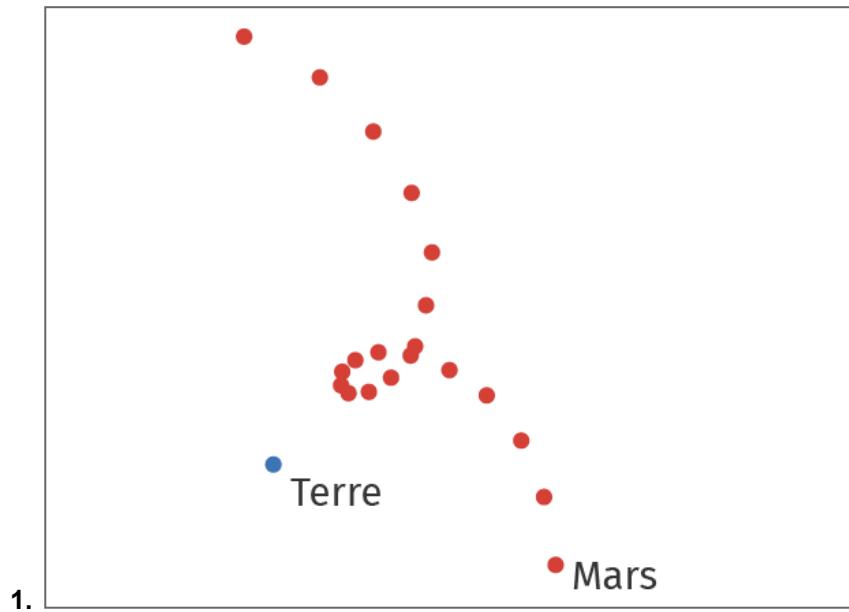


2. Lors d'une éclipse solaire, la Lune est observée dans une phase de nouvelle Lune depuis la Terre.

Exercice 5

Compétence principalement travaillée : utiliser la notion de référentiel.

Correction :



1.

2. On remarque que la trajectoire de Mars par rapport à la Terre n'est pas circulaire : la planète semble revenir en arrière pour reprendre son mouvement de rotation, on parle de rétrogradation. On retrouve ici les observations de Platon.

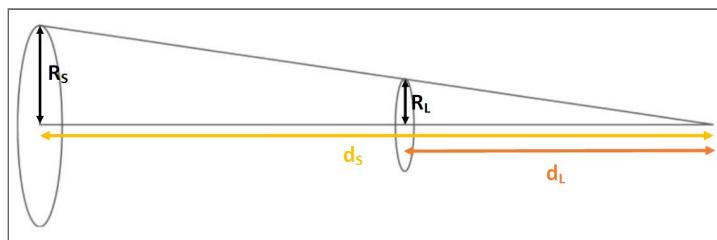
4.3. Le coin des experts

Exercice 6

Compétence principalement travaillée : pratiquer le calcul mathématique.

Correction :

1. Lors d'une éclipse totale, la Lune est placée entre le soleil et la Terre.
2.



3. D'après le théorème de Thalès :

$$\frac{d_S}{R_S} = \frac{d_L}{R_L}$$

Donc, on a :



$$d_S = \frac{d_L \cdot R_L}{R_L} = \frac{384 \times 10^3 \times 696 \times 10^3}{1737} = 154 \times 10^6 \text{ km}$$

La valeur trouvée est très proche de la valeur déterminée actuellement de $149,6 \times 10^6 \text{ km}$.

Exercice 7

Compétence principalement travaillée : interpréter des arguments historiques pour discuter de la théorie héliocentrique.

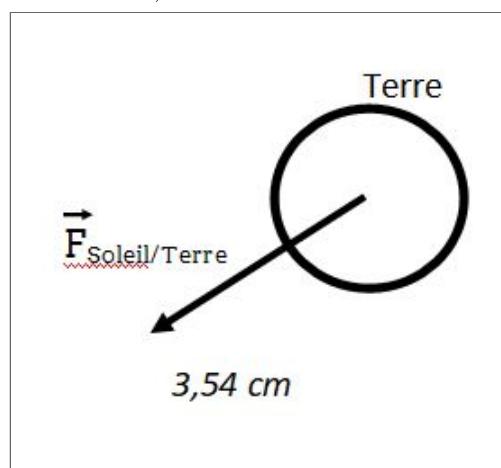
Référence bibliographique : *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, Isaac Newton, traduction d'Émilie du Châtelet. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k29037w/f1.item>

Correction :

1. Ici, Newton fait référence au principe d'inertie. En effet, si les planètes n'étaient soumises à aucune force, elles auraient un mouvement rectiligne et uniforme.

2. Les planètes sont en révolution autour du Soleil, elles ne sont donc pas en mouvement rectiligne. Elles sont donc soumises à une force, en l'occurrence la force d'attraction gravitationnelle du Soleil.

$$F_{\text{Soleil/Terre}} = \frac{G \cdot m_{\text{Soleil}} \cdot m_{\text{Terre}}}{d_{\text{Terre/Soleil}}^2} = \frac{6,674 \times 10^{-11} \times (1,989 \times 10^{30} \times 5,972 \times 10^{24})}{(149,6 \times 10^9)^2}$$
$$= 3,54 \times 10^{22} \text{ N}$$





Livre du professeur - Matière niveau

Chapitre 11 : Le son, phénomène vibratoire

Introduction

Présentation

Le chapitre 11 concernant le son en tant que phénomène vibratoire a pour premier objectif d'introduire le quatrième et dernier thème du programme d'enseignement scientifique du tronc commun de première. Il établit un lien avec les notions auparavant étudiées en classe de seconde en physique-chimie.

Ce chapitre permet en outre d'aborder le son principalement dans un contexte musical (et faire une brève introduction au chapitre 12), et ainsi faire lien avec la suite de l'ouvrage.

Il a pour objectif de revenir sur les grandeurs inhérentes aux sons périodiques (fréquence et période) et d'introduire les niveaux d'intensité sonore pour faire le lien avec le chapitre 14.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

Le programme de la classe de seconde est très ambitieux concernant les notions étudiées sur le son. Ci-dessous l'extrait du programme :

| | |
|---|---|
| Émission et propagation d'un signal sonore. | Décrire le principe de l'émission d'un signal sonore par la mise en vibration d'un objet et l'intérêt de la présence d'une caisse de résonance. |
| Vitesse de propagation d'un signal sonore. | Expliquer le rôle joué par le milieu matériel dans le phénomène de propagation d'un signal sonore. |
| | Citer une valeur approchée de la vitesse de propagation d'un signal sonore dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées. |
| | Mesurer la vitesse d'un signal sonore. |
| | |
| Signal sonore périodique, fréquence et période. | Définir et déterminer la période et la fréquence d'un signal sonore notamment à partir de sa représentation temporelle. |
| Relation entre période et fréquence. | Utiliser une chaîne de mesure pour obtenir des informations sur les vibrations d'un objet émettant un |



| | |
|--|--|
| | signal sonore. |
| | Mesurer la période d'un signal sonore périodique. |
| | Utiliser un dispositif comportant un microcontrôleur pour produire un signal sonore. |
| | Capacités mathématiques : identifier une fonction périodique et déterminer sa période. |
| | |
| Perception du son : lien entre fréquence et hauteur ; lien entre forme du signal et timbre ; lien qualitatif entre amplitude, intensité sonore et niveau d'intensité sonore. | Citer les domaines de fréquences des sons audibles, des infrasons et des ultrasons. |
| Échelle de niveaux d'intensité sonore. | Relier qualitativement la fréquence à la hauteur d'un son audible. |
| | Relier qualitativement intensité sonore et niveau d'intensité sonore. |
| | Exploiter une échelle de niveau d'intensité sonore et citer les dangers inhérents à l'exposition sonore. |
| | Enregistrer et caractériser un son (hauteur, timbre, niveau d'intensité sonore, etc.) à l'aide d'un dispositif expérimental dédié, d'un smartphone, etc. |

Activité 1 : Le *la* d'un ukulélé, d'une guitare et d'un téléphone (documentaire)

1.1. Généralités

L'objectif de l'activité est d'aborder la notion de timbre en comparant l'allure de spectres de deux instruments et d'un téléphone jouant la même note, ou plus précisément, ayant la même fréquence fondamentale.

D'autre part, cette activité aborde la notion d'harmoniques et la relation qui les lie avec la fréquence fondamentale. La question finale aborde la distinction entre son pur et son composé.

Objectifs notionnels :

- Un son pur est associé à un signal dépendant du temps de façon sinusoïdale ;
- Un signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de f . Le son associé à ce signal est un son composé ;



- f est appelée fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques.

Objectifs méthodologiques :

- Utiliser un logiciel permettant de visualiser le spectre d'un son.

Durée : L'activité est relativement rapide. En fonction des niveaux, on pourra avoir une activité s'étalant entre 30 minutes et 45 minutes en tenant compte du temps de prise en main du logiciel Audacity et de la rédaction des questions.

1.2. Présentation des documents

1.2.1. Ensemble documentaire A

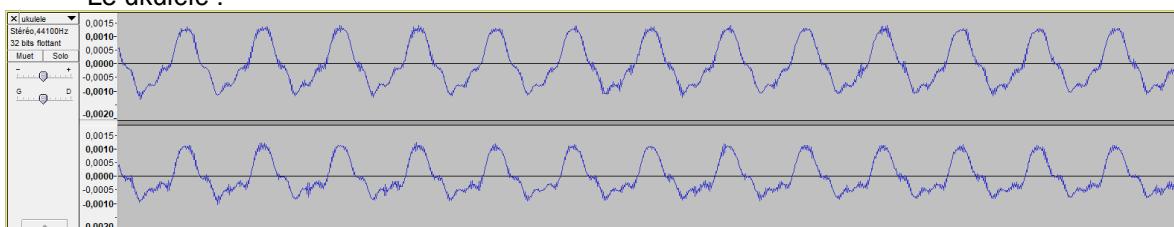
Présentation des documents :

- **Document 1** : document permettant d'introduire les deux instruments à cordes étudiés (guitare et ukulélé) et le téléphone.
- **Document 2** : il présente un exemple de spectre de son composé possédant des harmoniques. Il fait mention de la relation entre la fréquence fondamentale et les harmoniques.
- **Travaux pratiques** : cet encart présente le protocole permettant le tracé d'un spectre à l'aide du logiciel Audacity.

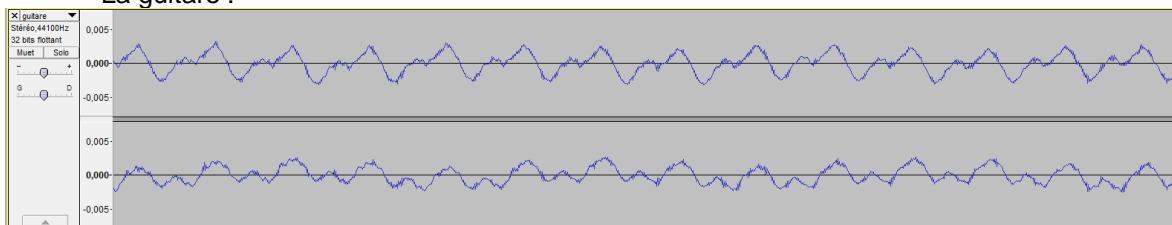
Réponses attendues aux questions :

- 1. À partir des trois fichiers audio, on peut représenter le signal électrique associé à l'onde sonore pour une dizaine de périodes. On constate que les trois signaux sont certes tous périodiques mais que les motifs élémentaires sont très différents d'un signal à l'autre.

Le ukulélé :

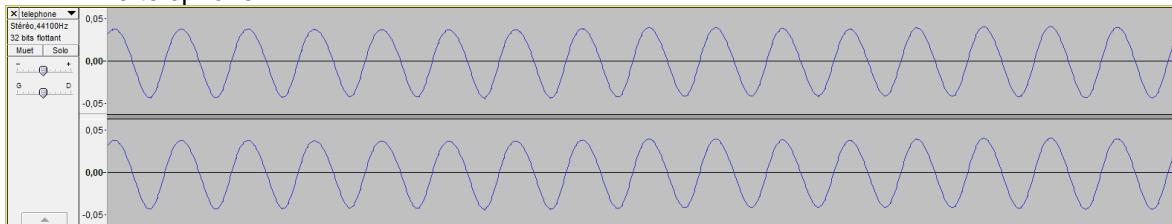


La guitare :





Le téléphone :



- **2.** Pour déterminer la fréquence des signaux, on peut sélectionner une portion du signal correspondant à plusieurs périodes N , mesurer la durée Δt de cette portion pour pouvoir remonter à T :

$$T = \frac{\Delta t}{N}$$

La fréquence fondamentale f se déduit à partir de la relation : $f = \frac{1}{T}$ d'où par substitution :
$$f = \frac{N}{\Delta t}$$

On réalise l'application numérique pour la guitare en prenant $N = 26$ périodes pour une durée $\Delta t = 0,059$ s :

AN : $f = \frac{26}{0,059}$

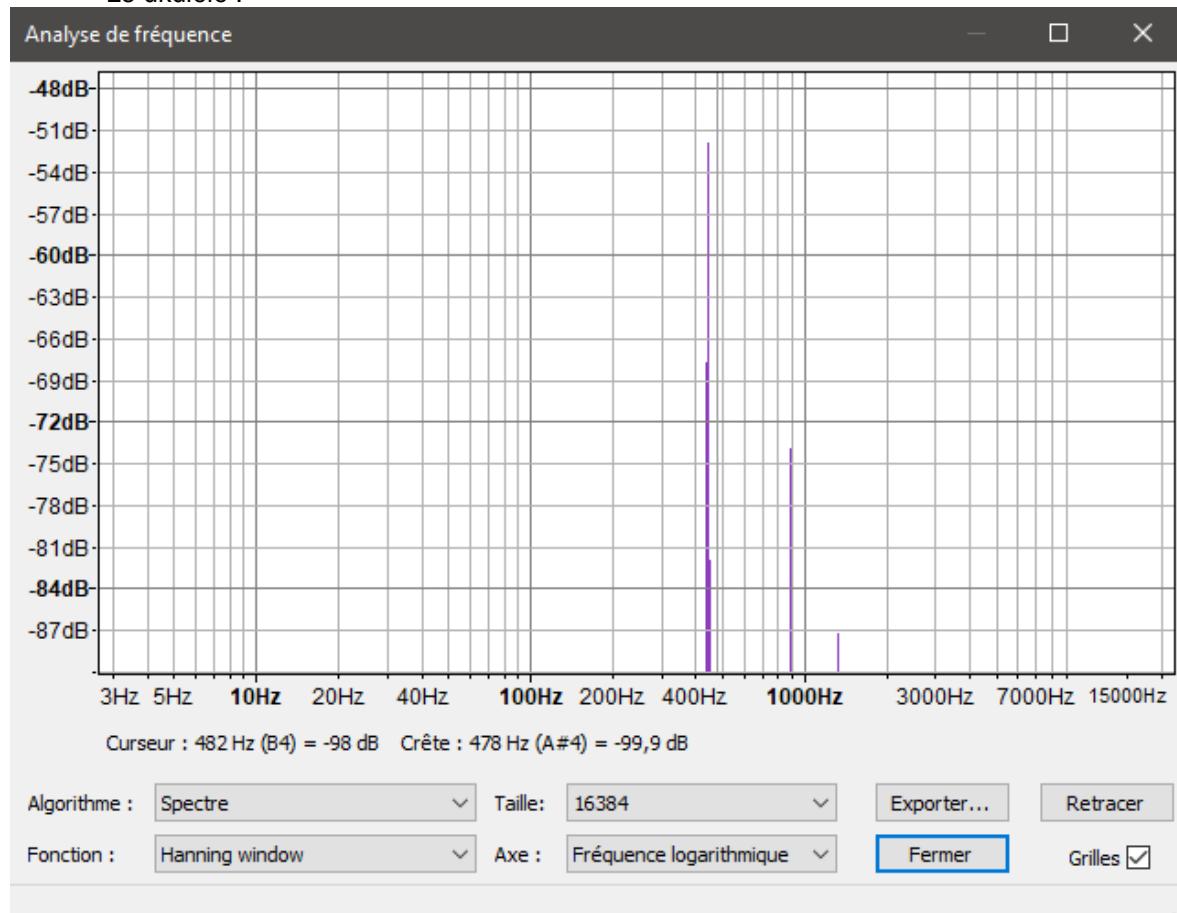
$$f = 440 \text{ Hz}$$

La même méthode aboutit à des fréquences également égales à 440 Hz pour le ukulélé et le téléphone.

- **3.** En traçant les spectres à l'aide d'Audacity, on constate que les signaux sont composés d'une multitude d'harmoniques, dont les amplitudes sont différentes. Cette différence de représentation spectrale aboutit à des "colorations" de sons différentes. On parle de timbre dans le cas d'un instrument.

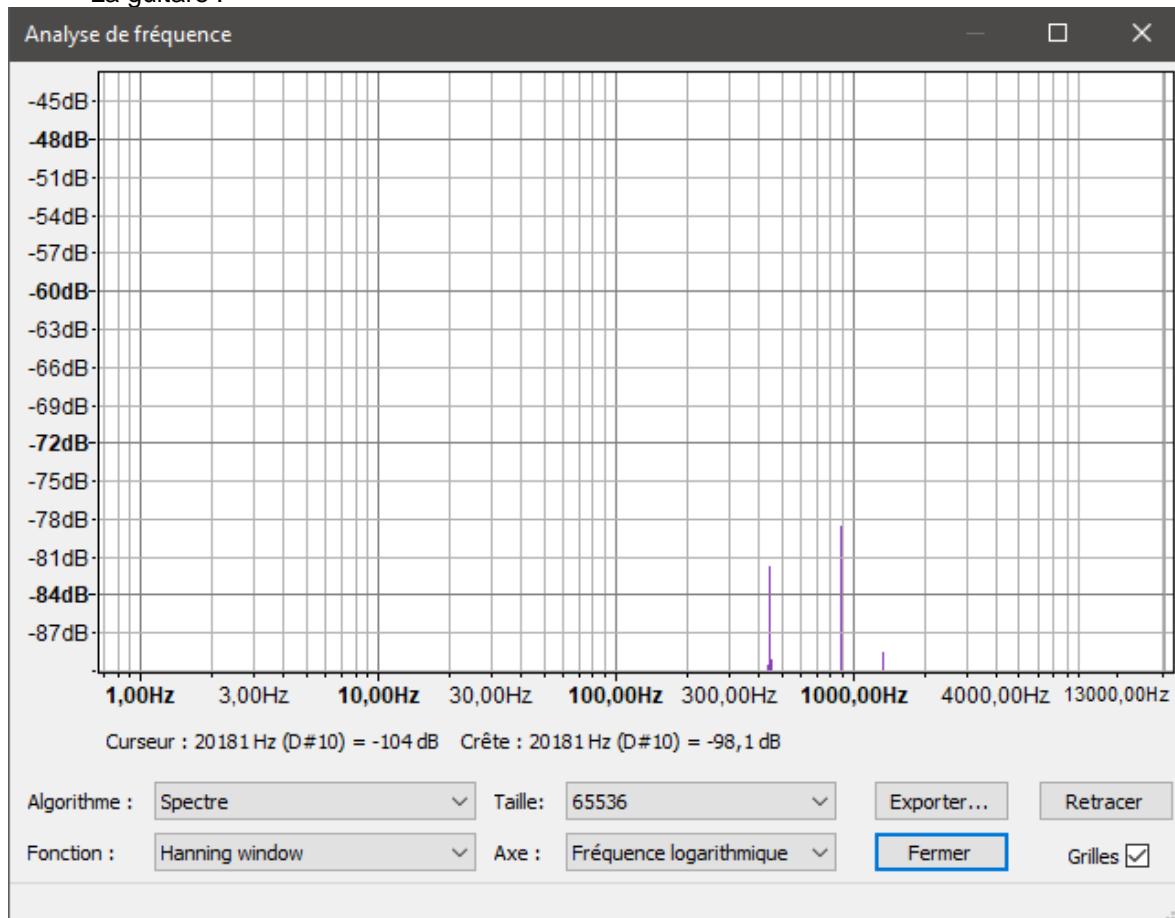


Le ukulélé :



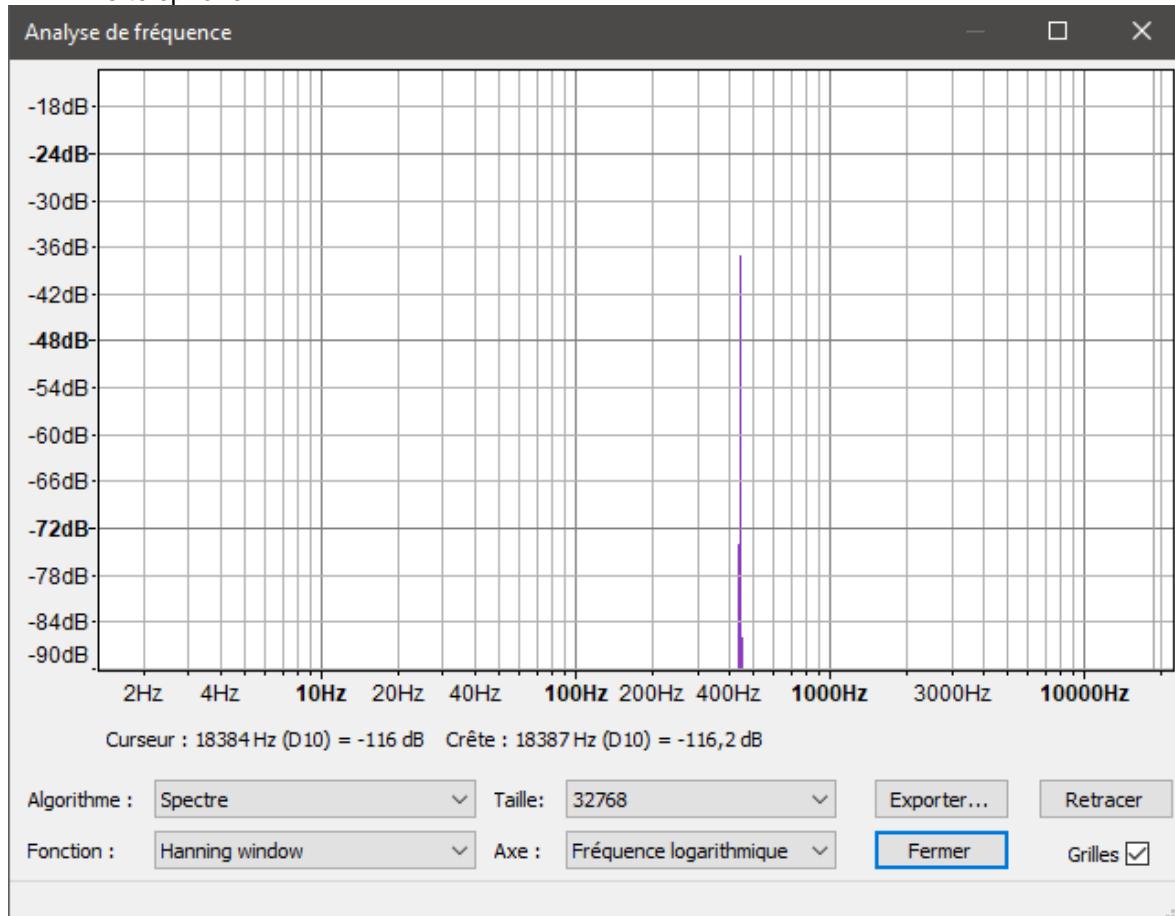


La guitare :





Le téléphone :



- 4. Le son qui se rapproche le plus d'un son pur est celui dont la représentation du signal électrique associé au cours du temps correspond à une sinusoïde ; dans ce cas, le spectre de ce signal ne possède qu'un seul pic. Ici, le signal qui s'en rapproche le plus est celui du téléphone.

Sources :

- Logiciel Audacity : <https://audacity.fr/>

Ressources complémentaires :

- Logiciel Regressi : <http://regressi.fr/WordPress/download/>



1.3. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

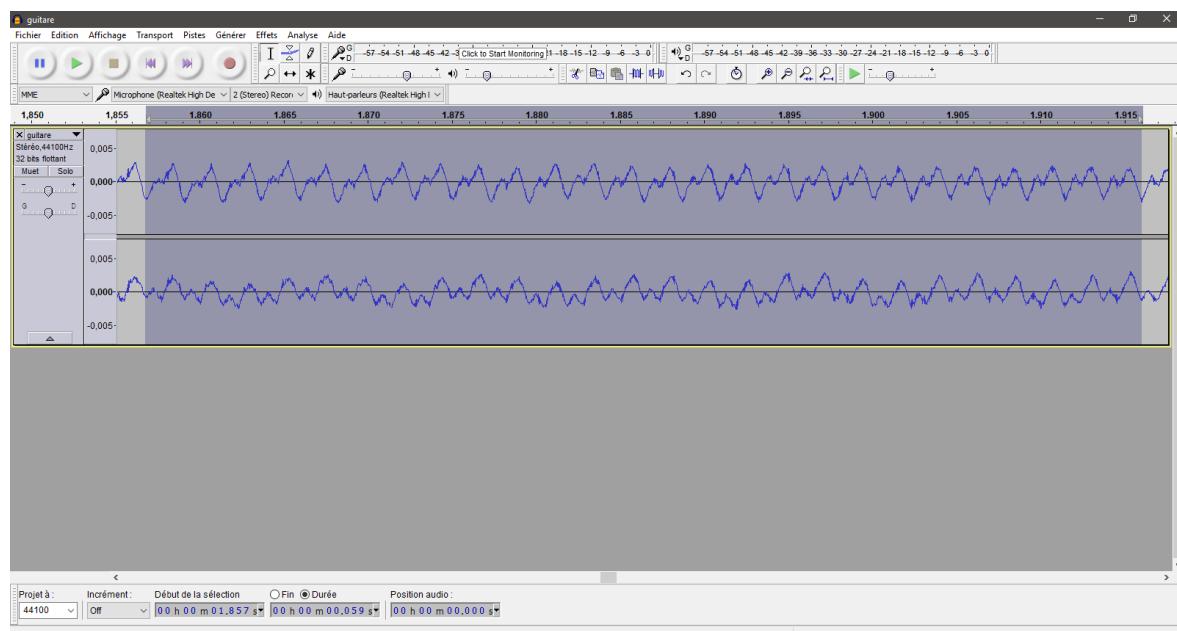
- Logiciel Audacity (gratuit) ou Regressi (gratuit pour les élèves).
- Trois fichiers audios (ukulele.avi, guitare.avi, telephone.avi).

Protocole :

- Télécharger un des fichiers audios.
- Ouvrir le fichier audio avec le logiciel Audacity.
- Ecouter l'enregistrement et sélectionner la partie du signal.
- Tracer le spectre à partir de l'onglet *Analyse*.
- Représenter celui-ci avec le plus de points possible, en échelle logarithmique.

Résultats attendus :

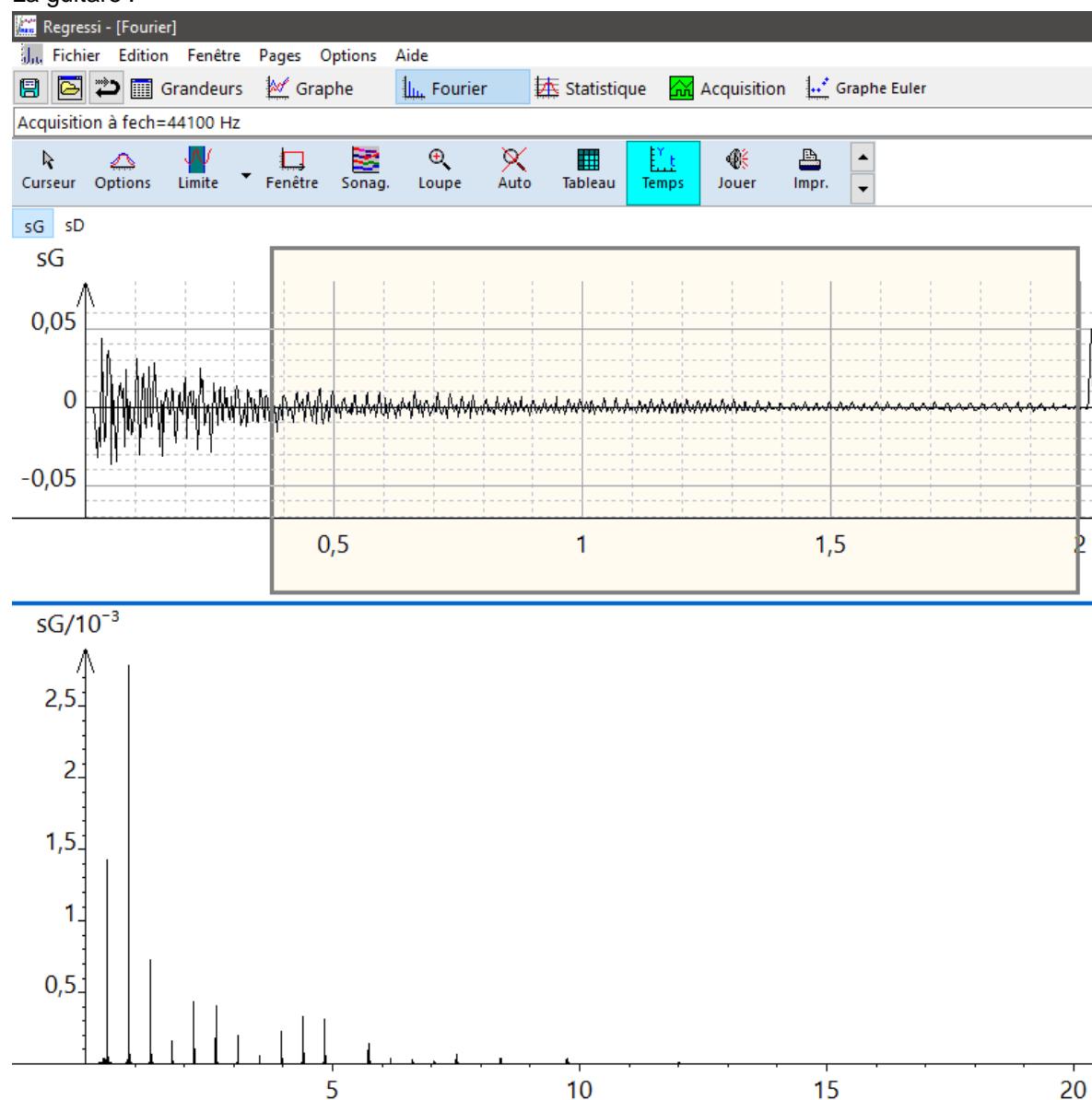
Exemple de représentation obtenue et sélection d'une portion de signal pour la guitare :



On peut également réaliser cette étude sur Regressi dont l'analyse spectrale sera nettement plus aboutie.

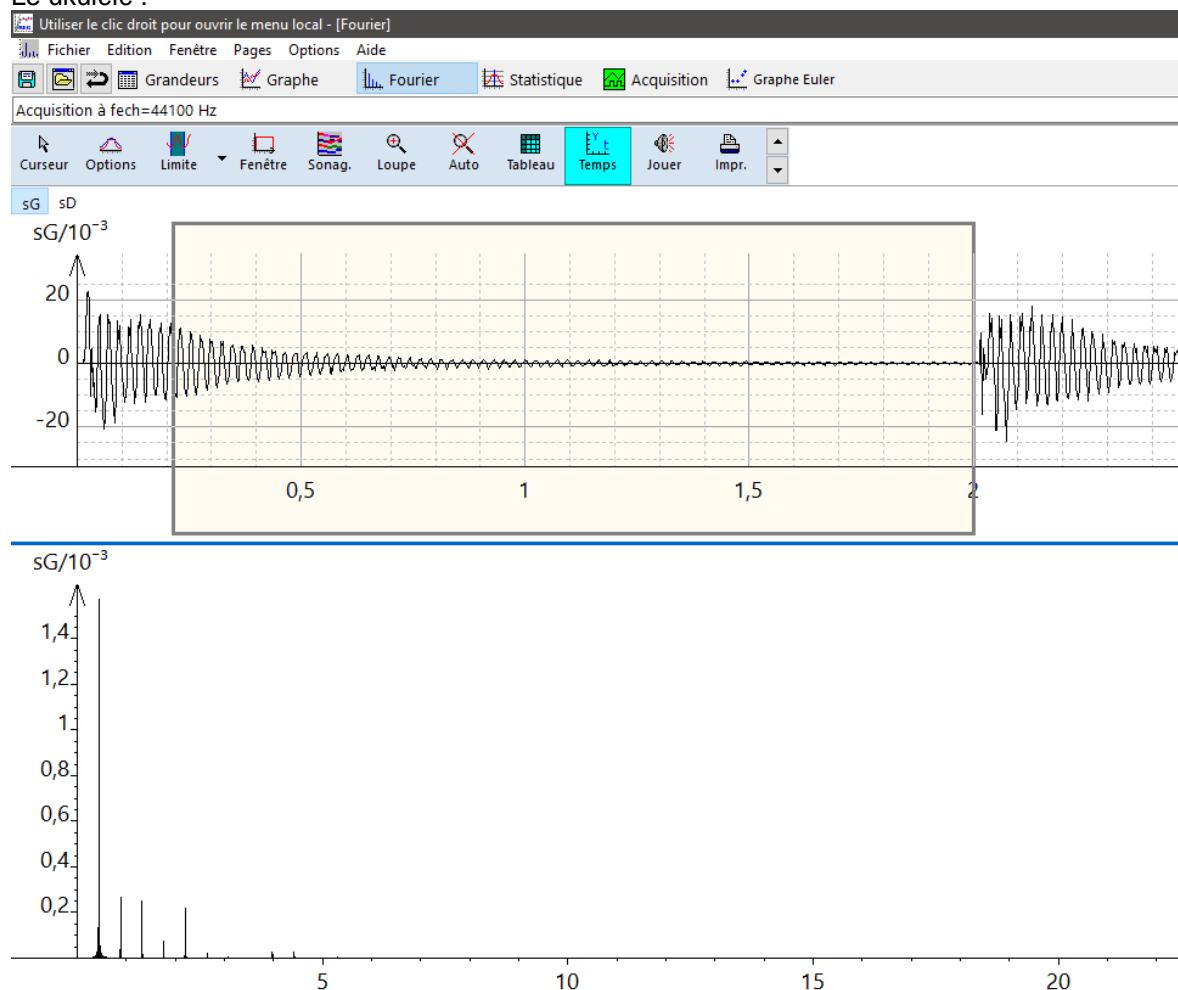


La guitare :

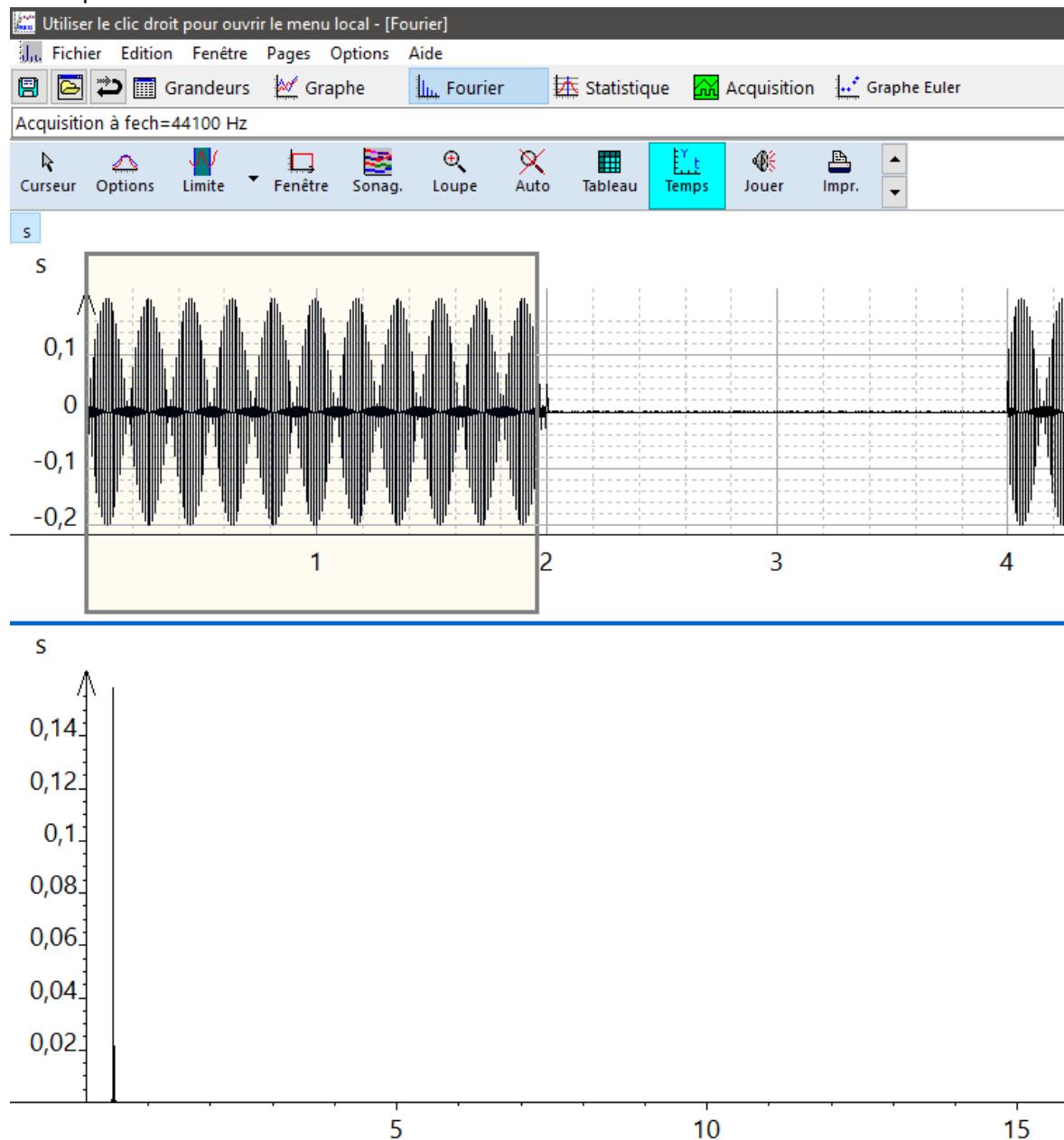




Le ukulélé :



Le téléphone :



On constate également qu'il est plus simple de conclure que le téléphone se rapproche le plus d'un son pur car le spectre de celui-ci ne présente quasiment qu'une seule fréquence constitutive.



Activité 2 : De la musique synthétique (documentaire)

2.1. Généralités

L'activité proposée est une activité ayant pour objectif de faire synthétiser une mélodie aux élèves en jouant sur la correspondance entre hauteur de la note et fréquence, mais également tempo et durée de la note.

Objectifs notionnels :

- Un son pur est associé à un signal dépendant du temps de façon sinusoïdale ;
- Un signal périodique de fréquence f se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de f . Le son associé à ce signal est un son composé ;
- f est appelée fréquence fondamentale, les autres fréquences sont appelées harmoniques.

Objectifs méthodologiques :

- Utiliser un logiciel permettant de visualiser le spectre d'un son ;
- Utiliser un logiciel pour produire des sons purs et composés.

Durée : 30 à 45 minutes.

2.2. Présentation des documents

2.2.1. Ensemble documentaire A

Présentation des documents :

- **Document 1** : Il s'agit d'une partition. Le document est un extrait d'une mélodie connue. Relativement courte, il ne s'agit que de deux mesures.
- **Document 2** : Ce document fourni permet de faire le lien entre hauteur d'une note et la fréquence fondamentale à jouer par un instrument.
- **Document 3** : Dernier document permettant d'analyser la durée d'une note à partir du tempo de la partition.

Différenciation : Si la partition est trop simple ou trop ambitieuse en fonction du niveau des élèves, on pourra utiliser l'éditeur <https://flat.io/fr> gratuit permettant de générer des partitions.

Réponses attendues :

- 1. À partir du tableau du doc. 2, on peut établir les tableaux suivants pour les neufs notes :



| | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Numéro de la note (en partant de la gauche) | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Note | La | La | La | Fa |
| Fréquence en hertz (Hz) | 440, 00 | 440, 00 | 440, 00 | 349, 23 |

| | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Numéro de la note (en partant de la gauche) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Note | Do | La | Fa | Do | La |
| Fréquence en hertz (Hz) | 523, 25 | 440, 00 | 349, 23 | 523, 25 | 440, 00 |

$$\Delta t_{\text{noire}} = \frac{a}{T_0}$$

- 2. À partir de la formule fournie, on peut calculer la durée Δt_{noire} :

$$\text{AN : } \Delta t_{\text{noire}} = \frac{60}{100}$$

$$\Delta t_{\text{noire}} = 0,60 \text{ s}$$

Le soupir dure aussi longtemps que la noire, et la croche deux fois moins longtemps, soit 0,30 s.

- 3. Une fois synthétisée, en attribuant les bonnes durées aux différentes notes, on reconnaît l'extrait de "La marche impériale" soulignant les arrivées de Dark Vador dans la saga Star Wars.



Activité 3 : La fondamentale d'une corde vibrante (activité de groupe)

3.1. Généralités

La double activité permet de faire émerger la dépendance entre longueur d'une corde vibrante l et la fréquence fondamentale f du son émis par la vibration.

Objectifs notionnels :

- Une corde tendue émet en vibrant un son composé dont la fréquence fondamentale ne dépend que de ses caractéristiques (longueur, tension, masse linéique).

Objectifs méthodologiques :

- Relier qualitativement la fréquence fondamentale du signal émis et la longueur d'une corde vibrante.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Identifier l'allure d'une courbe en vue d'une modélisation.

Durée : 30 minutes en tenant compte de la mise en commun (l'activité destinée au groupe 1 est la plus simple (on peut donc envisager de prévoir une répartition des élèves par niveau).

3.2. Présentation des documents

Ensemble documentaire A : groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le document présente brièvement le dispositif expérimental correspondant à la corde de Melde.
- **Document 2** : Pour différentes longueurs de corde l , on fournit la mesure expérimentale de la fréquence de vibration f au dixième de hertz près.

Suggestions de questions :

- Représentez l'évolution de f en fonction de l .
- Identifiez le modèle mathématique le plus adapté à l'évolution des points de mesure.



Ensemble documentaire B : groupe 2

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le document présente les différents éléments d'une guitare, notamment les frettes dont il est question par la suite et de la légende.
- **Document 2** : Le document fournit les fréquences des sons émis par la corde la plus à gauche sur l'image en fonction du numéro de la frette sur laquelle on pose le doigt pour raccourcir la longueur de la corde vibrante.

Suggestions de questions :

- 1. Mesurez la longueur l_0 de la corde la plus à gauche en utilisant la légende fournie.
- 2. Mesurez les distances l_n des huit premières frettes au chevalet.
- 3. Identifiez le modèle mathématique le plus adéquat correspondant à l'évolution des points de mesure.

3.3. Les indicateurs de réussite

- Groupe 1 :
 - Il est nécessaire de tracer le graphique représentant les points de mesure de la fréquence fondamentale f de la corde vibrante de Melde en fonction de sa longueur l .
 - À partir des quatre propositions, déterminer le modèle qui convient en reconnaissant l'allure de la courbe passant par les points de mesure.
- Groupe 2 :
 - Le premier indicateur permet de prendre connaissance de la légende associée à l'illustration et de déterminer la longueur de la corde à vide, entre le sillet et le chevalet pour la corde la plus à gauche.
 - En tenant compte de la légende fournie, on peut dès lors déterminer la distance entre la n-ième frette et le chevalet.
 - Il est nécessaire de représenter les points de mesure de f la fréquence fondamentale du son émis par la corde vibrante en fonction de la longueur de vibration l et de lui associer une courbe cohérente.



Différenciation :

| | |
|---|--|
| <p>Coup de pouce (question 2 pour le groupe 1 et 3 pour le groupe 2)</p> | <p>Tracer sur une calculatrice graphique les courbes représentatives des fonctions proposées dans l'énoncé (linéaire, affine, hyperbolique et parabolique) en remplaçant les paramètres a, b et c par des valeurs numériques quelconques ; comparer alors les allures de ces différentes courbes.</p> |
|---|--|

3.4. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel Groupe 1 :

- Ordinateurs disposant d'un tableur-grapheur pour la modélisation.
- Éventuellement, un générateur de vibrations + corde adaptée + une poulie + une masselotte.
Remarque : des valeurs sont déjà fournies (doc. 2) de manière à pouvoir réaliser l'activité en classe entière, sans matériel.

Matériel Groupe 2 :

- Ordinateurs disposant d'un tableur-grapheur pour la modélisation.
- Éventuellement, une guitare (acoustique ou électrique).

Remarque : les valeurs des longueurs de corde pour chaque frette peuvent être extraites de l'image et de l'échelle fournie, de manière à pouvoir réaliser l'activité en classe entière, sans matériel spécifique.

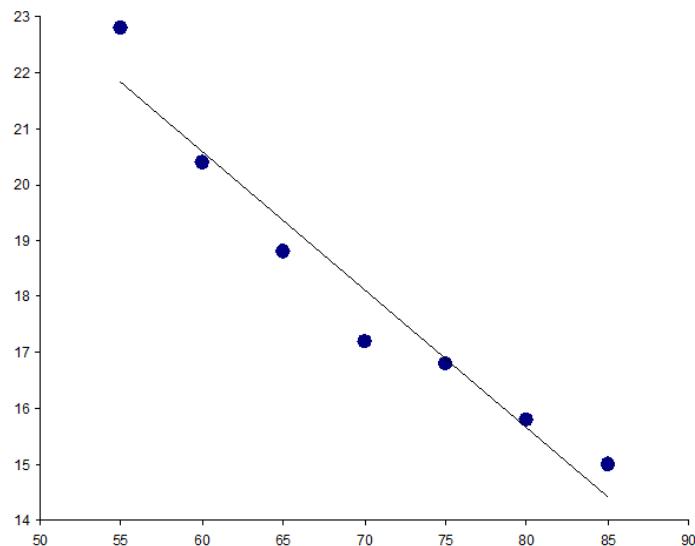
Protocole :

- Mesurer la longueur l entre le générateur de vibrations et la poulie.
- Allumer le générateur de vibrations.
- Ajuster la fréquence f de vibrations pour obtenir l'amplitude de vibrations de la corde la plus élevée possible pour un seul fuseau.
- Relever la fréquence fondamentale f .

Résultats attendus :

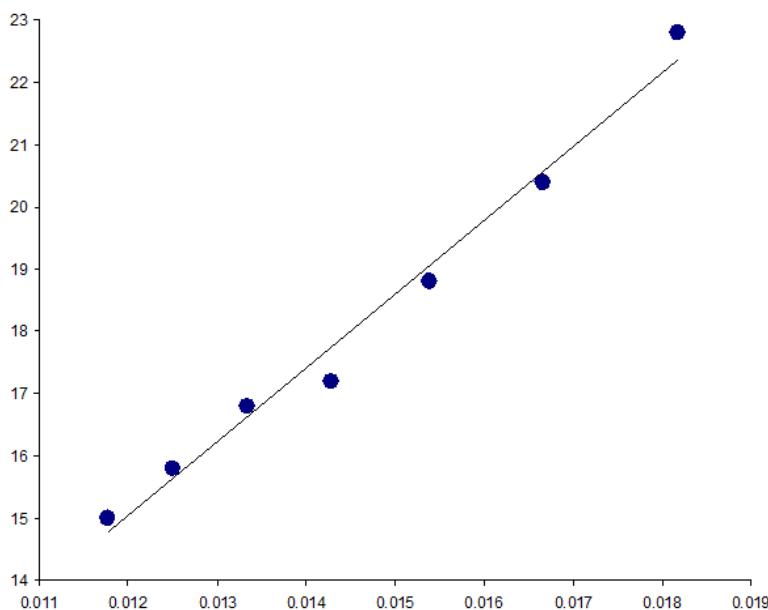
- Groupe 1 :

Évolution de la fréquence fondamentale f en (Hz) en fonction de la longueur de la corde vibrante l en (cm)



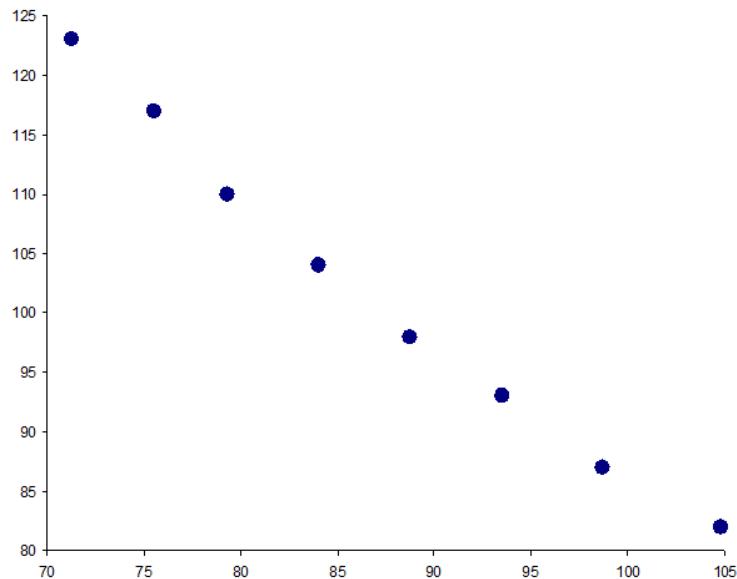
On constate que la courbe représentant au mieux l'évolution des points n'est pas affine mais de type hyperbolique. On peut tracer l'évolution de $\frac{1}{f}$ en fonction de $\frac{1}{l}$ pour s'en assurer :

Évolution de la fréquence fondamentale f en (Hz) en fonction de l'inverse de la longueur de la corde vibrante l en (cm)



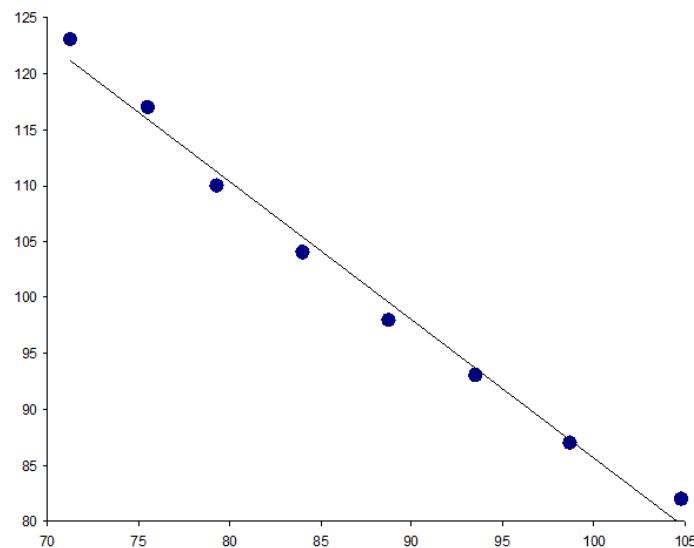
- Groupe 2 :
La représentation de f en fonction de l peut être mal interprétée :

Évolution de la fréquence fondamentale f en (Hz) en fonction de la longueur de la corde vibrante l en (cm)



On pourrait croire, a priori, que les points sont alignés. Un simple ajout de courbe de tendance permet de confirmer que l'évolution n'est pas affine :

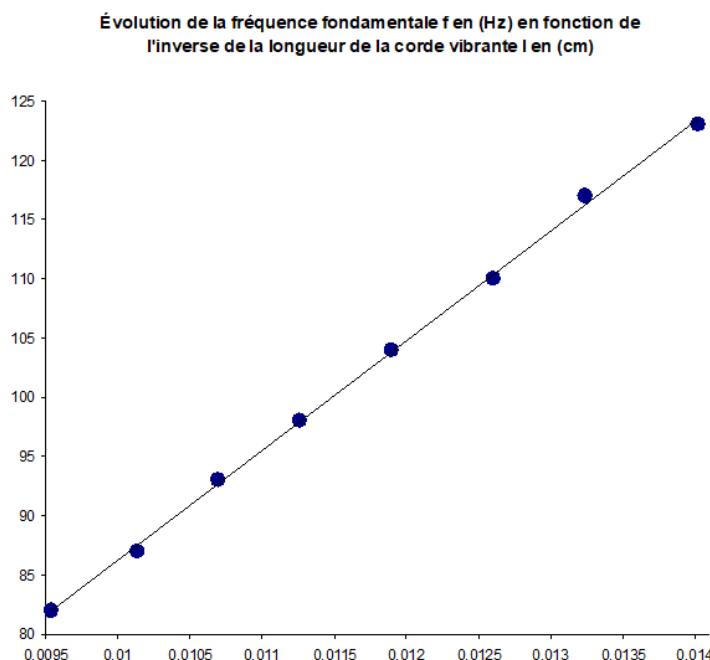
Évolution de la fréquence fondamentale f en (Hz) en fonction de la longueur de la corde vibrante l en (cm)



$\frac{1}{l}$

En revanche, en traçant l'évolution de f en fonction de $\frac{1}{l}$, on constate que le modèle est bien linéaire

:



Activité 4 : Les niveaux d'intensité sonore (activité de groupe)

4.1. Généralités

L'activité a pour but d'aborder les notions d'intensité sonore et de niveau d'intensité sonore en comparant deux sources sonores : le décollage d'une fusée et le vol d'une dizaine de milliers de moustiques.

Objectifs notionnels :

- La puissance par unité de surface transportée par une onde sonore est quantifiée par son intensité. Son niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels selon une échelle logarithmique.

Objectifs méthodologiques :

- Relier puissance sonore par unité de surface et niveau d'intensité sonore exprimé en décibels.

Durée : 30 minutes.



4.2. Présentation des documents

4.2.1. Ensemble documentaire A : groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le document présente la source sonore et lui associe une puissance de 350 MW.
- **Document 2** : Une illustration d'Apollo 4 et le lanceur Saturn V, non nécessaire pour mener à bien l'activité.
- **Document 3** : Le document présente la notion d'intensité sonore, correspondant au rapport entre une puissance sonore et une surface de propagation. Celle-ci est simplifiée en considérant qu'il s'agit d'une propagation homogène et sphérique.
- **Document 4** : Le document aborde la notion de niveau d'intensité sonore, avec l'introduction de la fonction \log . La formule est précisée dans ce document.

Suggestions de questions :

- 1. Exprimer l'intensité sonore I en fonction de la distance r entre la source et sa réception.
- 2. Exprimer le niveau d'intensité sonore L en fonction de P .
- 3. Calculer le niveau d'intensité sonore L du décollage de Saturn V à 3 km.

Ressources complémentaires :

- <https://www.youtube.com/watch?v=xdxzMPi19sU>
Le décollage d'Apollo 11 à l'aide du lanceur Saturn V.

4.2.2. Ensemble documentaire B : groupe 2

Présentation des documents :

- **Document 1** : Le document présente le moustique-tigre et le niveau d'intensité sonore perçu à un mètre.
- **Document 2** : Le document présente les deux relations de passage entre intensité sonore I et niveau d'intensité sonore L .
- **Document 3** : Le document souligne qu'une intensité sonore perçue correspond à la somme des intensités sonores associées à un bruit particulier, prises séparément.
- **Document 4** : Le document présente la dépendance du niveau d'intensité sonore en fonction du nombre de sources sonores produisant la même intensité sonore.

Suggestions de questions :

- 1. Donner un argument permettant d'affirmer que le niveau d'intensité sonore L n'est pas proportionnel au nombre de moustiques se trouvant à 1 m de soi.



- 2. Exprimer l'intensité sonore totale I_t en fonction du nombre de moustiques n et de l'intensité sonore I produite par un moustique.
- 3. Calculer l'intensité sonore I d'un moustique à 1 m de soi.
- 4. Calculer le niveau d'intensité sonore produit par une dizaine de milliers de moustiques.

4.3. Les indicateurs de réussite

- Groupe 1 :
 - 1. L'intensité sonore I équivaut à :
$$I = \frac{P}{S} I = \frac{P}{4 \pi \cdot r^2}$$
 - 2. Le niveau d'intensité sonore L se déduit de la réponse précédente :
$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) L = 10 \log \left(\frac{P}{4 \pi \cdot r^2 \cdot I_0} \right)$$
 - 3. AN :
$$L = 10 \times \log \left(\frac{350 \times 10^6}{4 \pi \cdot (3 \times 10^3)^2 \cdot 10^{-12}} \right) L = 125 \text{ dB}$$
- Groupe 2 :
 - 1. En doublant l'intensité sonore, on augmente le niveau d'intensité sonore L de 3,0 dB ; en la multipliant par 10, on l'augmente de 10,0 dB. Cette évolution n'étant pas proportionnelle, le niveau d'intensité sonore ne peut être proportionnel au nombre de moustiques.
 - 2. L'intensité sonore est quant à elle proportionnelle au nombre de moustiques : $I_t = n \cdot I$
 - 3. L'intensité sonore peut être calculée à partir de la relation : $I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$
AN : $I = 10^{-12} \times 10^{\frac{35}{10}}$
 $I = 3,2 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
 - 4. Le niveau d'intensité sonore L_t peut être calculé ainsi :
$$L_t = 10 \log \left(\frac{I_t}{I_0} \right)$$
$$L_t = 10 \log \left(\frac{n \cdot I}{I_0} \right)$$

AN :
$$L_t = 10 \times \log \left(\frac{10^4 \times 3,2 \times 10^{-9}}{10^{-12}} \right) L_t = 75 \text{ dB}$$



Exercices

5.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Le diapason

Compétence principalement travaillée : Déterminer la fréquence d'un signal périodique.

Correction :

1. Le signal électrique représenté est bel et bien associé à un son pur car la forme de la courbe correspond à une sinusoïde.

2. Par lecture graphique, on mesure pour quatre périodes une durée $\Delta t = 0,0091$ s. Pour remonter à la période T , il suffit de réaliser le calcul suivant :

$$T = \frac{\Delta t}{4}$$

AN : $T = \frac{0,0091}{4}$
 $T = 0,00228$ s

3. La fréquence f d'un signal et sa période T sont liées par : $f = \frac{1}{T}$

AN : $f = \frac{1}{0,00228}$
 $f = 440$ Hz

Exercice 2 : Le réflexe stapédien

Compétence principalement travaillée : Utiliser la relation liant intensité sonore et niveau d'intensité sonore.

Correction :

1. D'après l'échelle, un niveau d'intensité sonore $L = 80$ dB correspond à une intensité sonore $I = 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

2. D'après la relation :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}}$$

AN : $I = 10^{-12} \times 10^{\frac{80}{10}}$
 $I = 10^{-4} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Exercice 3 : Une corde de piano

Compétence principalement travaillée : Relier la longueur d'une corde tendue à sa fréquence de vibration.



Correction :

1. La fréquence fondamentale f du son produit par une corde tendue de piano est inversement proportionnelle à sa longueur l . Par conséquent, si l augmente, f diminue.

2. $f = \frac{a}{l}$

$a = f \cdot l$

AN : $a = 440 \times 85 \times 10^{-2}$

$a = 374 \text{ Hz} \cdot \text{m}^{-1}$

5.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : La production d'un signal composé

Compétence principalement travaillée : Lire et utiliser l'analyse spectrale d'un son composé.

Correction :

1. D'après le spectre en fréquences représenté, la fréquence fondamentale f du son composé est égale à $f = 440 \text{ Hz}$.

2. Le tableau suivant recense, pour chaque harmonique de rang n , la fréquence f_n et l'amplitude A_n :

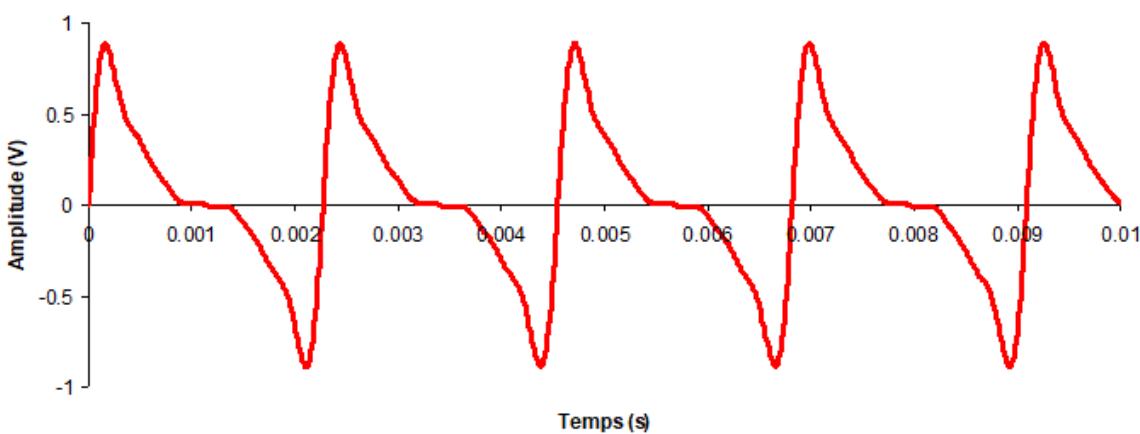
| Rang n | Fréquence f_n (Hz) | Amplitude A_n (V) |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| Rang n des harmoniques | Fréquence (Hz) | Amplitude A_n (V) |
| 0 | 440 | 0,40 |
| 1 | 880 | 0,35 |
| 2 | 1320 | 0,20 |
| 3 | 1760 | 0,15 |
| 4 | 2200 | 0,10 |
| 5 | 2640 | 0,05 |
| 6 | 3080 | 0,02 |

3. En ne tenant compte que des harmoniques d'amplitude non nulle, on a :

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) + A_1 \cdot \sin(4 \pi \cdot f \cdot t) + A_2 \cdot \sin(6 \pi \cdot f \cdot t) + A_3 \cdot \sin(8 \pi \cdot f \cdot t) + A_4 \cdot \sin(10 \pi \cdot f \cdot t) + A_5 \cdot \sin(12 \pi \cdot f \cdot t) + A_6 \cdot \sin(14 \pi \cdot f \cdot t)$$

4. Le tracé sur calculatrice ou sur tableur donne l'allure suivante :

Évolution au cours du temps d'un signal périodique associé à un son composé



Exercice 5 : Le hurlement du coyote

Compétence principalement travaillée : Utiliser la relation liant niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore, puissance par unité de surface.

Correction :

1. La surface d'une sphère S s'exprime, en fonction de son rayon r , par la relation : $S = 4 \pi \cdot r^2$

2. L'intensité sonore I est le rapport entre une puissance P et une surface S . On suppose donc ici que $I = \frac{P}{S}$ avec S la surface d'une sphère de rayon d soit : $I = \frac{P}{4 \pi \cdot d^2}$

3. On rappelle que $L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$. En combinant les deux équations, on aboutit à :

$$L = 10 \log \left(\frac{P}{4 \pi \cdot d^2 \cdot I_0} \right)$$

4. On présente le calcul à 1 km :

AN :

$$L_{d=1000} = 29 \text{ dB}$$

À 100 m, le niveau d'intensité sonore est égal à $L_{d=100} = 49 \text{ dB}$ et à 10 m, ce niveau est égal à $L_{d=10} = 69 \text{ dB}$.



Exercice 6 : Le placement des doigts sur le violon

Compétence principalement travaillée : Relier la fréquence fondamentale d'une corde vibrante à sa longueur.

Correction :

1. En fonction des mains, on obtient un écartement maximal entre 7 et 15 cm. On prendra $e = 10$ cm comme écartement pour la suite des questions.

2. La fréquence fondamentale de la corde vibrante étant inversement proportionnelle à sa longueur, on a la relation suivante : $f = \frac{a}{l}$ avec a une constante.

En manipulant la relation précédente, on peut aboutir à $f \cdot l = a$. De cette manière, le produit de f et de l étant toujours égal à a pour une même corde, on peut noter (l_1, f_1) et (l_2, f_2) deux couples de longueur et de fréquence dont le produit est égal à a , soit : $f_1 \cdot l_1 = f_2 \cdot l_2$

3. D'après l'énoncé, le *la#3* est associée à la longueur l_1 et le *mi4* est associée à la longueur l_2 . L'écartement e étant défini comme l'écart entre ces deux longueurs, on a : $e = l_1 - l_2$ soit $l_1 = l_2 + e$

En substituant l_1 dans la relation établie à la question précédente, on a :

$$\begin{aligned}f_1 \cdot (l_2 + e) &= f_2 \cdot l_2 \\f_1 \cdot l_2 + f_1 \cdot e &= f_2 \cdot l_2 \\(f_1 - f_2) \cdot l_2 &= -f_1 \cdot e \\l_2 &= \frac{f_1 \cdot e}{f_2 - f_1}\end{aligned}$$

4. En reprenant le même raisonnement que pour la question 2, on a : $f \cdot l = f_2 \cdot l_2$ soit $l = \frac{f_2 \cdot l_2}{f}$

$$l = \frac{f_2 \cdot \frac{f_1 \cdot e}{f_2 - f_1}}{f}$$

Or, en substituant l_2 par l'expression trouvée précédemment, on a :

$$l = \frac{f_2 \cdot f_1 \cdot e}{f \cdot (f_2 - f_1)}$$

soit en simplifiant :

$$\begin{aligned}l &= \frac{659,26 \times 466,16 \times 10 \times 10^{-2}}{440,00 \times (659,26 - 466,16)} \\ \text{AN : } l &= 0,37 \text{ m} = 37 \text{ cm}\end{aligned}$$

Le résultat obtenu est cohérent avec la longueur traditionnelle entre le sillet et le chevalet qui mesure en réalité 34 cm pour les violons dits entiers, c'est-à-dire les violons destinés aux adultes. Des tailles plus petites existent, notamment pour les enfants, en raison d'un écartement maximal des doigts plus petit.



5.3. Le coin des experts

Exercice 7 : La synthèse d'un timbre

Compétence principalement travaillée : Exploiter un signal périodique.

Correction :

1. Par lecture graphique, on peut estimer qu'il y a $N = 5$ périodes durant la durée $\Delta t = 46 \text{ ms}$. La période T du signal périodique correspond donc à :
- $$T = \frac{\Delta t}{N}$$

On peut donc en déduire la fréquence fondamentale f : $f = \frac{1}{T}$ soit en substituant T : $f = \frac{N}{\Delta t}$

AN : $f = \frac{5}{46 \times 10^{-3}}$
 $f = 110 \text{ Hz}$

La fréquence fondamentale est donc égale à $f = 110 \text{ Hz}$.

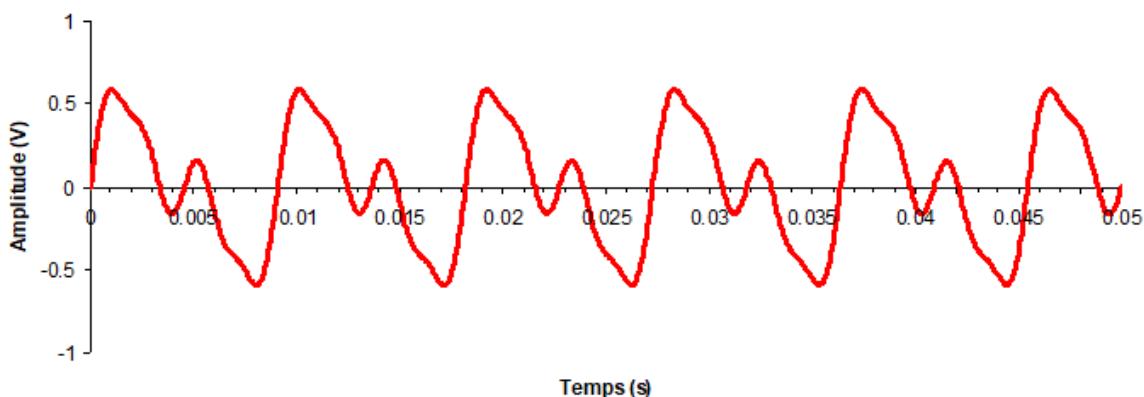
2. Les fréquences harmoniques f_n sont des multiples de la fréquence fondamentale f , c'est-à-dire que l'on peut remplir le tableau fourni avec les fréquences des harmoniques :

| Rang n | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Amplitude A_n en volt(s) (V) | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| Fréquence f_n en hertz (Hz) | 110 | 220 | 330 | 440 |

3. L'énoncé invite à tracer la fonction suivante à la calculatrice ou sur un tableur :
$$A(t) = A_0 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) + A_1 \cdot \sin(4 \pi \cdot f \cdot t) + A_2 \cdot \sin(6 \pi \cdot f \cdot t) + A_3 \cdot \sin(8 \pi \cdot f \cdot t)$$

Le tracé donne, pour une fenêtre d'affichage correspondant à celle de l'énoncé :

Évolution au cours du temps d'un signal périodique associé au son produit par un synthétiseur



4. On constate que le rendu n'est pas tout à fait similaire à la représentation fournie, notamment sur les parties maximales et minimales des motifs élémentaires. Cette différence est probablement due au nombre insuffisant d'harmoniques dont on a tenu compte pour le tracé du signal. Un nombre plus important aurait permis d'affiner davantage la courbe en vue de la faire coïncider avec le signal réellement synthétisé.

Exercice 8 : Le niveau d'intensité sonore dans un concert

Compétence principalement travaillée : Relier intensité sonore et niveau d'intensité sonore.

Correction :

1. Le niveau d'intensité sonore L_1 peut être calculé à partir de l'intensité sonore I_1 grâce à la relation :
 $I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}}$
AN : $I_1 = 10^{-12} \times 10^{\frac{120}{10}}$
 $I_1 = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

2. En supposant que la puissance sonore P se conserve et que cette propagation est uniforme dans la demi-sphère face à elle de rayon r , on a, de manière générale : $I = \frac{P}{S}$ avec $S = 2 \pi \cdot r^2$ la surface d'une demi-sphère.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{P}{S_1} \quad I_2 = \frac{P}{S_2} \\ \text{On a donc } I_2 &= \frac{I_1 \cdot S_1}{S_2} \quad \text{En substituant par } P, \text{ on peut exprimer } I_2 \text{ en fonction de } I_1 : \\ I_2 &= \frac{I_1 \cdot (2 \pi \cdot r_1^2)}{2 \pi \cdot r_2^2} \\ I_2 &= \frac{I_1 \cdot r_1^2}{r_2^2} \end{aligned}$$



3. On note ΔL la perte en décibels du niveau d'intensité sonore perçu, soit la différence entre L_1 et L_2 : $\Delta L = L_1 - L_2$

On rappelle l'expression générale permettant de calculer le niveau d'intensité sonore L à partir de

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

l'intensité sonore I :

On a donc :

$$\begin{aligned}\Delta L &= 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) - 10 \log \left(\frac{I_2}{I_0} \right) \\ \Delta L &= 10 \left(\log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) - \log \left(\frac{I_2}{I_0} \right) \right) \\ \Delta L &= 10 \left(\log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) - \log \left(\frac{I_1 \cdot r_1^2}{I_0 \cdot r_2^2} \right) \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{AN : } \Delta L &= 10 \times \left(\log \left(\frac{1}{10^{-12}} \right) - \log \left(\frac{1 \times 5^2}{10^{-12} \times 100^2} \right) \right) \\ \Delta L &= 26 \text{ dB}\end{aligned}$$

Exercice 9 : L'accordage d'une guitare

Compétence principalement travaillée : Lier qualitativement la fréquence fondamentale d'une corde vibrante avec sa longueur.

Correction :

1. La fréquence fondamentale f du son émis par une corde vibrante augmente si l'on diminue sa longueur l ; on parle d'évolution inversement proportionnelle. Cela se traduit par la relation mathématique suivante : $f = \frac{a}{l}$

2. La relation précédente peut être écrite $f \cdot l = a$ avec a une constante propre à la corde considérée. De cette manière, en restant sur cette même corde, on a :

$$\begin{aligned}f \cdot l &= f' \cdot l_n \\ l_n &= \frac{f \cdot l}{f'}\end{aligned}$$

3. En substituant l_n à l'aide de l'expression fournie dans l'énoncé, on a :

$$\begin{aligned}\frac{l}{2^{\frac{n}{12}}} &= \frac{f \cdot l}{f'} \\ \frac{1}{2^{\frac{n}{12}}} &= \frac{f}{f'}\end{aligned}$$

4. On présente le calcul pour la détermination du numéro de la frette n de la corde la plus à gauche :

$$n = \frac{12}{\log(2)} \cdot \log \left(\frac{f'}{f} \right)$$



$$\text{AN : } n = \frac{12}{\log(2)} \times \log \left(\frac{110,00}{82,41} \right)$$

$$n = 5$$

Ce même calcul aboutit pour les six cordes à :

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|
| Numéro de la corde (en partant de la gauche) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Numéro de la frette n | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 |

5.4. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 1 : Le diapason (pour les apprentis dans le manuel papier et initiés pour le numérique)

Compétence principalement travaillée : Déterminer la fréquence d'un signal périodique.

Questions :

1. Calculez la fréquence f du son produit par un diapason.
2. Proposez une modification de a ou de l pour doubler la fréquence fondamentale f du diapason.

Correction :

1. Par lecture graphique, on mesure pour quatre périodes une durée $\Delta t = 0,0091$ s. Pour remonter à la période T , il suffit de réaliser le calcul suivant : $T = \frac{\Delta t}{4}$
- $\text{AN : } T = \frac{0,0091}{4}$
- $$T = 0,00228 \text{ s}$$

La fréquence f d'un signal et sa période T sont liées par : $f = \frac{1}{T}$

$$\text{AN : } f = \frac{1}{0,00228}$$

$$f = 440 \text{ Hz}$$

2. Pour doubler la fréquence f du diapason, on peut soit doubler la valeur de a , c'est-à-dire doubler le rayon des branches cylindriques ou bien diviser la longueur l des branches par 2 d'après la relation fournie.



Exercice 4 : La production d'un signal composé (pour les initiés dans le manuel papier et experts pour le numérique)

Compétence principalement travaillée : Lire et utiliser l'analyse spectrale d'un son composé.

Questions :

1. D'après la relation générale fournie dans l'énoncé, complétez la relation suivante :
$$A(t) = A_0 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) + A_1 \cdot \sin(4 \pi \cdot f \cdot t) +$$

2. Tracez à la calculatrice l'amplitude du signal $A(t)$ en fonction du temps t sur une fenêtre d'affichage adéquate et représentez son allure.

Correction :

1. En ne tenant compte que des harmoniques d'amplitude non nulle, on a :

$$A(t) = A_0 \cdot \sin(2 \pi \cdot f \cdot t) + A_1 \cdot \sin(4 \pi \cdot f \cdot t) + A_2 \cdot \sin(6 \pi \cdot f \cdot t) + A_3 \cdot \sin(8 \pi \cdot f \cdot t) + A_4 \cdot \sin(10 \pi \cdot f \cdot t) + A_5 \cdot \sin(12 \pi \cdot f \cdot t) + A_6 \cdot \sin(14 \pi \cdot f \cdot t)$$

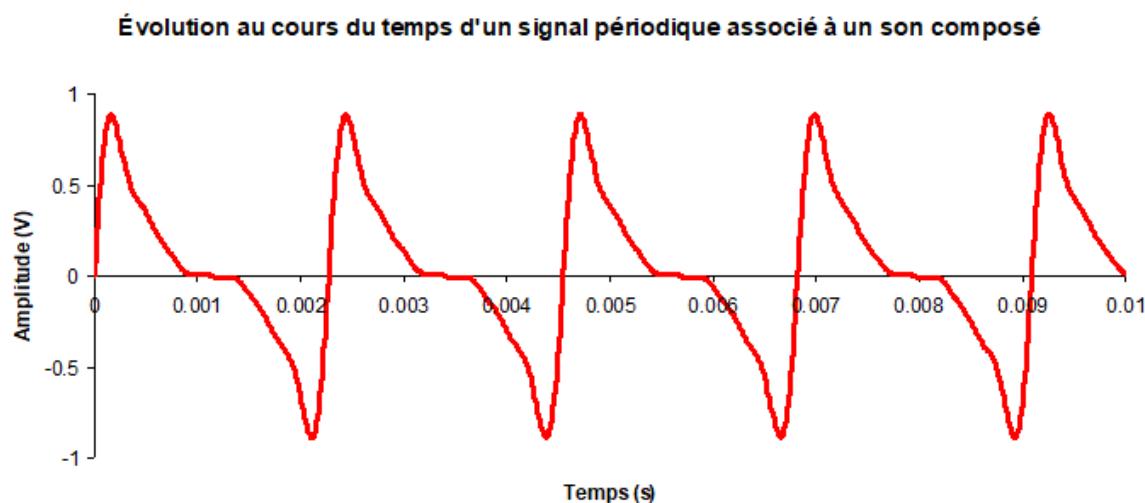
Or, d'après le spectre en fréquences représenté, la fréquence fondamentale f du son composé est égale à $f = 440$ Hz.

Le tableau suivant recense, pour chaque harmonique de rang n , la fréquence f_n et l'amplitude A_n :

| Rang n | Fréquence f_n (Hz) | Amplitude A_n (V) |
|----------|----------------------|---------------------|
| 0 | 440 | 0,40 |
| 1 | 880 | 0,35 |
| 2 | 1320 | 0,20 |
| 3 | 1760 | 0,15 |
| 4 | 2200 | 0,10 |
| 5 | 2640 | 0,05 |
| 6 | 3080 | 0,02 |



2. Le tracé sur calculatrice ou sur tableur donne l'allure suivante :



Exercice 6 : Le placement des doigts sur le violon (pour les initiés dans le manuel papier et apprentis pour le numérique)

Compétence principalement travaillée : Relier la fréquence fondamentale d'une corde vibrante à sa longueur.

Questions :

1. Estimez l'écartement maximal possible, noté e et exprimé en centimètres (cm), entre votre index et votre auriculaire.
2. Donnez la relation reliant l_1 , l_2 et e .

$$3. \text{ Démontrez que } l_2 = \frac{f_1 \cdot e}{f_2 - f_1}.$$

- $$4. \text{ Démontrez que la longueur } l \text{ des cordes s'exprime } l = \frac{f_2 \cdot f_1 \cdot e}{f \cdot (f_2 - f_1)}$$
- et calculez cette longueur pour l'écartement e estimé à partir de vos doigts. Ce résultat est-il cohérent avec la dimension d'un violon traditionnel ?

Correction :

1. En fonction des mains, on obtient un écartement maximal entre 5 et 10 cm. On prendra $e = 10$ cm comme écartement pour la suite des questions.
2. D'après l'énoncé, le *la#3* est associée à la longueur l_1 et le *mi4* est associée à la longueur l_2 . L'écartement e étant défini comme l'écart entre ces deux longueurs, on a : $e = l_1 - l_2$ soit $l_1 = l_2 + e$



3. En substituant l_1 dans la relation fournie dans l'énoncé, on a :

$$\begin{aligned}f_1 \cdot (l_2 + e) &= f_2 \cdot l_2 \\f_1 \cdot l_2 + f_1 \cdot e &= f_2 \cdot l_2\end{aligned}$$

$$(f_1 - f_2) \cdot l_2 = -f_1 \cdot e$$

$$l_2 = \frac{f_1 \cdot e}{f_2 - f_1}$$

4. En reprenant le même raisonnement que pour la question 2, on a : $f \cdot l = f_2 \cdot l_2$ soit $l = \frac{f_2 \cdot l_2}{f}$.

$$l = \frac{f_2 \cdot \frac{f_1 \cdot e}{f_2 - f_1}}{f}$$

Or, en substituant l_2 par l'expression trouvée précédemment, on a :

$$l = \frac{f_2 \cdot f_1 \cdot e}{f \cdot (f_2 - f_1)}$$

soit en simplifiant :

$$\begin{aligned}l &= \frac{659,26 \times 466,16 \times 10 \times 10^{-2}}{440,00 \times (659,26 - 466,16)} \\AN: \quad l &= 0,37 \text{ m} = 37 \text{ cm}\end{aligned}$$

Le résultat obtenu est cohérent avec la longueur traditionnelle entre le sillet et le chevalet qui mesure en réalité 34 cm pour les violons dits entiers, c'est-à-dire les violons destinés aux adultes. Des tailles plus petites existent, notamment pour les enfants, en raison d'un écartement maximal des doigts plus petit.

Exercice 8 : Le niveau d'intensité sonore dans un concert (pour les experts dans le manuel papier et initiés pour le numérique)

Compétence principalement travaillée : Relier intensité sonore et niveau d'intensité sonore.

Questions :

1. Sachant que le son dans un concert peut atteindre 120 dB au plus près des enceintes à l'avant, calculez l'intensité sonore I_1 perçue par les premiers spectateurs.

2. Sachant que l'intensité sonore est une puissance par unité de surface, en déduire l'expression de I_2 en fonction de I_1 et des distances considérées d_1 et d_2 .

$$3. Démontrez que L_2 = 10 \log \left(\frac{I_1 \cdot d_1^2}{I_0 \cdot d_2^2} \right).$$

4. Calculez la perte en décibels du niveau d'intensité sonore perçu entre le public à l'avant et le public à l'arrière lors d'un concert.



Correction :

1. Le niveau d'intensité sonore L_1 peut être calculé à partir de l'intensité sonore I_1 grâce à la relation :
 $I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}}$

AN : $I_1 = 10^{-12} \times 10^{\frac{120}{10}}$
 $I_1 = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

2. En supposant que la puissance sonore P se conserve et que cette propagation est uniforme dans la demi-sphère face à elle de rayon r , on a, de manière générale : $I = \frac{P}{S}$ avec $S = 2 \pi \cdot r^2$ la surface d'une demi-sphère.

On a donc $I_1 = \frac{P}{S_1}$ et $I_2 = \frac{P}{S_2}$. En substituant par P , on peut exprimer I_2 en fonction de I_1 :

$$I_2 = \frac{I_1 \cdot S_1}{S_2}$$
$$I_2 = \frac{I_1 \cdot (2 \pi \cdot d_1^2)}{2 \pi \cdot d_2^2}$$
$$I_2 = \frac{I_1 \cdot d_1^2}{d_2^2}$$

3. En appliquant la réciproque de la relation utilisée dans la question 1, on a :

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{I_2}{I_0} \right)$$
$$L_2 = 10 \log \left(\frac{I_1 \cdot d_1^2}{I_0 \cdot d_2^2} \right)$$

4. On note ΔL la perte en décibels du niveau d'intensité sonore perçu, soit la différence entre L_1 et L_2 : $\Delta L = L_1 - L_2$

On a donc :

$$\Delta L = 10 \left(\log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) - \log \left(\frac{I_1 \cdot r_1^2}{I_0 \cdot r_2^2} \right) \right)$$

AN : $\Delta L = 10 \times \left(\log \left(\frac{1}{10^{-12}} \right) - \log \left(\frac{1 \times 5^2}{10^{-12} \times 100^2} \right) \right)$
 $\Delta L = 26 \text{ dB}$



Livre du professeur - Enseignement Scientifique

Chapitre 12 : Musique et nombres

Introduction

Présentation

Ce chapitre présente le principe de l'analyse fréquentielle des sons. Il permet de relier les domaines de la physique, de la musique et des mathématiques qui sont, en apparence, très différents.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

Les élèves ont travaillé sur la notion de signal sonore au cycle 4. Celle-ci a été réinvestie et approfondie en physique-chimie en seconde avec l'introduction des notions de période et de fréquence.

Activité 1 : La musique, un art organisé (documentaire)

1.1. Généralités

Vocabulaire : un intervalle entre deux sons est le rapport de leur fréquence fondamentale. Deux sons dont les fréquences sont dans un rapport 2/1 correspondent à une même note, à deux hauteurs différentes. L'intervalle qui les sépare s'appelle une octave. Une gamme est une suite finie de notes réparties sur une octave. Dans l'Antiquité, la construction des gammes était basée sur des fractions simples, (2/1, 3/2, 4/3, etc.). Une quinte est un intervalle entre deux fréquences de rapport 3/2.

Cette activité ouvre le chapitre intitulé « Musique et nombres », intégré au thème général portant sur le « Son et musique, porteurs d'informations ». Cette première activité documentaire permet d'introduire la notion de mathématiques dans la musique.

Objectifs notionnels :

- Introduire le vocabulaire de base en musicologie : intervalle, note, gamme et fréquence.

Objectifs méthodologiques :

- Étudier des documents en lien avec l'histoire des sciences, extraire l'information utile et manipuler une expression mathématique.

Durée : 30 minutes

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Manipuler une expression mathématique.

1.2. Présentation des documents et réponses aux questions

Les documents permettent de définir ce qu'est la musique et renseignent sur le lien étroit qu'elle entretient avec les mathématiques. Ils permettent d'avoir les connaissances essentielles pour répondre aux questions afin d'avoir une première approche scientifique de la musique.

Réponses attendues aux questions :

1. La fréquence est le seul paramètre auquel on s'intéresse pour construire une gamme musicale car c'est elle qui définit la note musicale, indépendamment de l'instrument.
2. Pythagore a choisi les fréquences qui vont définir les notes de sa gamme en pinçant des fractions entières de corde : $1/2$, $2/3$, $3/4$, etc.
3. D'après la formule, la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur de la corde : plus la corde est longue plus la fréquence est petite.

$$f = \frac{1}{2L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

4. Pour *do* :

$$\text{Pour } do \text{ à l'octave : } L' = \frac{L}{2} \text{ donc } f' = \frac{1}{L'} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\text{Pour } sol : L'' = \frac{2}{3} L \text{ donc } f'' = \frac{3}{4L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$\text{Pour } fa : L''' = \frac{3}{4} L \text{ donc } f''' = \frac{2}{3L} \cdot \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

- 5.
- $$\text{Intervalle entre } do \text{ et } do \text{ à l'octave : } \frac{f'}{f} = \frac{2}{1}$$
- $$\text{Intervalle entre } do \text{ et } sol : \frac{f''}{f} = \frac{3}{2}$$
- $$\text{Intervalle entre } do \text{ et } fa : \frac{f'''}{f} = \frac{4}{3}$$

Les intervalles entre les notes sont des fractions simples ($2/1$, $3/2$, $4/3$, etc.). La construction d'une gamme étant basée sur ses rapports, les notes font donc partie d'une même gamme.

Activité 2 : À la recherche de l'harmonie musicale (documentaire)

2.1. Généralités

Les sons dont les fréquences sont dans des rapports simples étaient alors considérés comme les seuls à être consonants. Cette activité documentaire explique comment, depuis l'Antiquité, les savants ont recherché l'harmonie musicale, définie comme une combinaison de sons qui paraissent agréables à l'oreille.

Objectif notionnel :

- Introduire la notion d'harmonie.

Objectif méthodologique :

- Étudier des documents en lien avec l'histoire des sciences, extraire l'information utile.

Durée : 20 minutes

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Manipuler une expression mathématique.
- Connaissances mathématiques acquises au collège sur les fractions, à mobiliser dans un contexte artistique.

2.2. Présentation des documents et réponses aux questions

Les documents permettent à l'élève de comprendre comment les mathématiciens de l'Antiquité ont cherché l'harmonie par la consonance des sons.

Réponses attendues aux questions :

1. Pythagore a eu l'idée de s'intéresser à l'harmonie en musique en passant devant une forge et en écoutant les sons produits par des marteaux de masse différente sur des cloches. Certains sont étaient agréables à l'oreille et d'autres non. Pythagore a alors cherché à comprendre l'origine de cette différence.
2. Deux notes sont harmonieuses si chacune de leur fréquence fondamentale se trouvent dans un rapport arithmétique simple.
3. Lorsque deux notes sont à l'octave, le rapport de leur fréquence fondamentale est égal à $2/1$, il s'agit d'un rapport arithmétique simple : l'intervalle à l'octave est consonant.
Lorsque deux notes sont à la quarte, le rapport de leur fréquence fondamentale est égal à $4/3$, il s'agit d'un rapport arithmétique simple : l'intervalle à la quarte est consonant.

$$\begin{aligned}\frac{f(\text{sol})}{f(\text{do})} &= \frac{3}{2} \\ \frac{f(\text{fa})}{f(\text{do})} &= \frac{4}{3} \\ \frac{f(\text{sol})}{f(\text{fa})} &= \frac{f(\text{sol})}{f(\text{do})} \cdot f(\text{do})f(\text{fa}) = \frac{3}{2} \times \frac{3}{4} = \frac{9}{8}\end{aligned}$$

9

Le rapport de leur fréquence fondamentale est égal à $\frac{9}{8}$, il s'agit d'un rapport arithmétique simple donc l'intervalle entre le *sol* et le *fa* est consonant.

Activité 3 : Construire les gammes (documentaire)

3.1. Généralités

Cette troisième activité documentaire revient sur la première construction de gamme par Pythagore. Il fut le premier à utiliser le système des quintes reposant sur la fréquence du son pour créer un nombre précis de notes sur un octave.

Objectif notionnel :

- L'objectif de cette activité est d'introduire le cycle des quintes.

Objectif méthodologique :

- Étudier des documents en lien avec l'histoire des sciences, extraire l'information utile et utiliser des notions mathématiques

Notions abordées :

Les gammes dites « de Pythagore » sont basées sur le cycle des quintes. Pour des raisons mathématiques, ce cycle des quintes ne « reboucle » jamais sur la note de départ. Toutefois, les cycles de 5, 7 ou 12 quintes « rebouclent » presque. Pour les gammes associées, l'identification de la dernière note avec la première impose que l'une des quintes du cycle ne corresponde pas exactement à la fréquence 3/2.

La connaissance des nombres irrationnels a permis, au XVII^e siècle, de construire des gammes à intervalles égaux.

Autres compétences mobilisables :

- Calculer des puissances et des quotients en lien avec le cycle des quintes.
- Mettre en place un raisonnement mathématique pour prouver que le cycle des quintes est infini.
- Utiliser la racine douzième de 2 pour partager l'octave en douze intervalles égaux.

Durée : 45 à 60 minutes

3.2. Présentation des documents

Les documents permettent à l'élève de comprendre la notion de quinte et son intérêt dans la construction d'une gamme musicale. La dimension mathématique est exploitée, et explique scientifiquement le découpage d'une gamme.

Réponses attendues aux questions :

1. Pour passer d'une colonne à une autre dans le tableau, il faut multiplier la valeur de la fréquence précédente par 3/2.

Pour passer d'une ligne à une autre dans le tableau, il faut diviser la valeur de la fréquence précédente par 2.

Il faut diviser une ou plusieurs fois certaines fréquences par deux pour revenir dans l'intervalle de départ (compris ici entre 100 et 200 Hz) et obtenir des notes séparées de moins d'une octave.

2. *do ; do # ; ré ; ré # ; mi ; fa ; fa # ; sol ; sol # ; la ; la # ; si*
3. L'ordre des notes dans le tableau et sur le cercle est le même. Au bout de la 12^e quinte, on obtient la note à l'octave de la note de base pour construire la gamme (ici *do* à l'octave).
4. Le comma est le décalage entre le *do* à l'octave théorique et le *do* obtenu grâce au cycle des quintes. La quinte du loup est un accord dissonant : l'intervalle *mi #* et *do* à l'octave étant plus court que les autres intervalles de la gamme, lorsque ces deux notes sont jouées, l'accord est dissonant et le son obtenu ressemble au cri du loup.
5. Les musiciens, dont Jean-Sébastien Bach, proposent une nouvelle manière de découper une gamme : la gamme tempérée. Ils découpent la gamme en 12 intervalles égaux.
6. $f = 100 \times \sqrt[12]{2} = 105,946 \text{ Hz}$
 $f' = f \times \sqrt[12]{2} = 112,245 \text{ Hz}$
 $f'' = f' \times \sqrt[12]{2} = 118,921 \text{ Hz}$
 $f''' = f'' \times \sqrt[12]{2} = 125,992 \text{ Hz}$
 $f'''' = f''' \times \sqrt[12]{2} = 133,484 \text{ Hz}$
 $f''''' = f'''' \times \sqrt[12]{2} = 141,421 \text{ Hz}$

La fréquence des 6 premières notes dans la gamme tempérée sont très proches des fréquences des 6 premières notes dans la gamme de Pythagore. Elles sont très proches mais pas égales. Les fréquences des notes de la gamme tempérées sont légèrement inférieures à celles de la gamme de Pythagore.

7. Pour créer leurs gammes respectives, Pythagore et Jean-Sébastien Bach ont utilisé les mathématiques. Pythagore s'est servi du cycle des quintes (donc des nombres rationnels) et Jean-Sébastien Bach a utilisé la racine 12^e de 2 (donc un nombre irrationnel).
Ainsi, jouer une note et une note à la quinte consiste à faire entendre une fréquence, puis la fréquence multipliée par 3/2. La musique est donc bien l'art de faire entendre les nombres.

Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Des notes à l'octave

Compétence principalement travaillée : Maîtriser les notions du cours

Correction :

1. $\frac{f_1}{f_2} = \frac{840}{440} = \frac{2}{1}$. L'intervalle entre ces deux notes signifie que les deux notes sont à l'octave.
2. Une octave est l'intervalle entre deux notes équivalent à 2. Deux notes à l'octave portent le même nom.
3. Deux sons dont les fréquences sont dans le rapport 2/1 correspondent à une même note, à deux hauteurs différentes. Amira a donc eu l'impression que Pablo et Timothée jouaient la même note.

Exercice 2 : Ton et demi-ton

Compétence principalement travaillée : Utiliser la racine douzième de 2 pour partager l'octave en douze intervalles égaux.

Correction :

1. Notes séparées par un limma : $do^\# / ré$; $ré / mi_b$; mi / fa ; $fa^\# / sol$; $sol^\# / la$; la / si_b ; si / do_2
Notes séparées par un apotome: $do / do^\#$; mi_b / mi ; $fa / fa^\#$; $sol / sol^\#$; sib / si
2. Intervalle d'un demi-ton : $\sqrt[12]{12}$
Intervalle d'un ton : $2 \sqrt[12]{2}$

Exercice 3 : La quinte

Compétence principalement travaillée : Calculer des puissances et des quotients en lien avec le cycle des quintes.

Correction :

1. $f(\text{quinte}) = \frac{3}{2} \times 100 = 150 \text{ Hz}$
2. L'intervalle entre deux notes à l'octave vaut 2 donc $f(do_2) = 2 \times 100 = 200 \text{ Hz}$.

3. Après avoir pris 12 fois la quinte de la note fondamentale,

$$f' = \left(\frac{3}{2}\right)^{12} \times 100 = 12\ 974,6337890625 \text{ Hz}$$

Il faut donc diviser par deux autant de fois que nécessaire pour retomber dans l'intervalle, ici 6 fois. $\frac{f'}{2^6} = 202,7 \text{ Hz}$ on ne retombe pas complètement sur la fréquence du *do* à l'octave, il y a un léger décalage (*comma*) à l'origine de la quinte du loup. On constate donc que le rapport de 2 entre deux octaves n'est pas tout à fait exact.

4.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : Un cycle infini ?

Compétence principalement travaillée : Mettre en place un raisonnement mathématique pour prouver que le cycle des quintes est infini.

Correction :

1. La fréquence entre chaque quinte est multipliée par $\frac{3}{2}$. À la douzième quinte, la fréquence a donc été multipliée par $\left(\frac{3}{2}\right)^{12}$.

La fréquence entre chaque octave est multipliée par 2. À la septième octave, la fréquence a donc été multipliée par 2^7 .

La phrase en gras se traduit mathématiquement par : $\left(\frac{3}{2}\right)^{12} \times f_0 \neq 2^7 \times f_0$. Par simplification des f_0 alors : $\left(\frac{3}{2}\right)^{12} \neq 2^7$.

2. L'égalité entre la n -ième quinte et la p -ième se traduit par la relation : $\left(\frac{3}{2}\right)^n = 2^p$.
3. La relation précédente peut s'écrire sous la forme : $3^n = 2^p \times 2^n$.
D'après l'énoncé, le terme 3^n est impair et, mathématiquement, le terme $2^p \times 2^n$ est forcément pair.
Un terme impair ne peut pas être égal à un terme pair, cette équation n'a donc pas de solution. Le cycle des quintes ne reboucle jamais sur l'octave.

Exercice 5 : La gamme de Zarlino

Compétence principalement travaillée : Calculer des puissances et des quotients en lien avec le cycle des quintes.

Correction :

1.

- L'intervalle entre deux notes de fréquence f_1 et f_2 à la tierce : $\frac{f_2}{f_1} = \frac{5}{4}$

$$\frac{f_3}{f_1} = \frac{3}{2}$$

L'intervalle de deux notes de fréquence f_1 et f_3 à la quinte :

- L'intervalle entre la note à la tierce de fréquence f_2 et la note à la quinte de fréquence

$$f_3 : f_3 = \frac{f_2}{f_1} \times \frac{f_1}{f_2} = \frac{3}{2} \times \frac{4}{5} = \frac{6}{5}$$

2. $f(\text{mi}) = \frac{5}{4} \times f(\text{do}) = \frac{5}{4} \times 100 = 125 \text{ Hz}$
 $f(\text{sol}) = \frac{3}{2} \times f(\text{do}) = \frac{3}{2} \times 100 = 150 \text{ Hz}$

$$f(\text{si}) = \frac{5}{4} \times f(\text{sol}) = \frac{5}{4} \times 150 = 187,5 \text{ Hz}$$

$$f(\text{ré}_2) = \frac{3}{2} \times f(\text{sol}) = \frac{3}{2} \times 150 = 225 \text{ Hz} \rightarrow f(\text{ré}) = \frac{225}{2} = 112,5 \text{ Hz}$$

$$f(\text{do}_2) = \frac{3}{2} \times f(\text{fa}) \quad \text{donc} \quad f(\text{fa}) = \frac{2}{3} \times f(\text{do}_2) = \frac{2}{3} \times 200 = 133,3 \text{ Hz}$$

$$f(\text{la}) = \frac{5}{4} \times f(\text{fa}) = \frac{5}{4} \times \frac{2}{3} \times f(\text{do}_2) = 166,7 \text{ Hz}$$

3. Les fréquences des notes dans la gamme de Zarlino, sans être exactement les mêmes que dans la gamme de Pythagore, restent proches.

Exercice 6 : Construction d'une harpe

Compétence principalement travaillée : Conduire un raisonnement quantitatif

Correction :

$$1. \quad f(\text{do}_2) = 2 \times f(\text{do}) \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{2L'} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}} = 2 \times \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Alors : $L' = \frac{L}{2}$

2. La longueur des cordes doit être comprise entre $\frac{L}{2}$ et L .

$$3. \quad \frac{f(\text{sol})}{f(\text{do})} = \frac{3}{2} \quad \text{d'où} \quad \frac{1}{2L''} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \frac{3}{2} \times \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \text{alors : } L'' = \frac{2}{3}L$$

4. En utilisant le même raisonnement qu'en question 3. alors :

$$L(3) = \frac{2}{3}L(2) = \frac{2}{3} \times \frac{2}{3} \times L = \frac{4}{9}L$$

. La corde est trop courte, on divise donc la fréquence par 2 ce qui revient à multiplier la longueur de la corde par 2. Donc : $L(3) = \frac{8}{9}L$.

Remarque : à chaque calcul, bien vérifier que le rapport est supérieur à 1/2, sinon il faut multiplier la longueur de la corde par 2.

$$L(4) = \frac{2}{3} \times L(3) = \frac{2}{3} \times \frac{8}{9} \times L(3) = \frac{16}{27}L$$

$$L(5) = \frac{2}{3} \times L(4) = \frac{2}{3} \times \frac{16}{27} \times L = \frac{32}{81}L \rightarrow L(5) \times 2 = \frac{64}{81}L$$

$$L(6) = \frac{2}{3} \times L(5) = \frac{2}{3} \times \frac{64}{81} \times L = \frac{128}{243}L$$

$$L(7) = \frac{2}{3} \times L(6) = \frac{2}{3} \times \frac{128}{243} \times L = \frac{256}{729}L \rightarrow L(7) \times 2 = \frac{512}{729}L$$

$$L(8) = \frac{2}{3} \times L(7) = \frac{2}{3} \times \frac{512}{729} \times L = \frac{1024}{2187}L \rightarrow L(8) \times 2 = \frac{2048}{2187}L$$

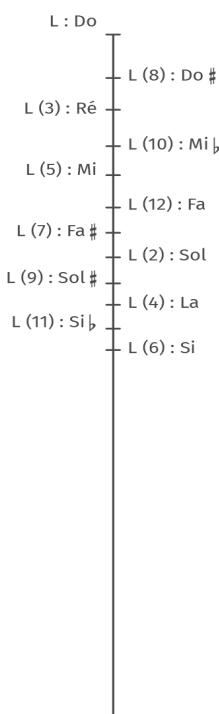
$$L(9) = \frac{2}{3} \times L(8) = \frac{2}{3} \times \frac{2048}{2187} \times L = \frac{4096}{6561}L$$

$$L(10) = \frac{2}{3} \times L(9) = \frac{2}{3} \times \frac{4096}{6561} \times L = \frac{8192}{19683}L \rightarrow L(10) \times 2 = \frac{16384}{19683}L$$

$$L(11) = \frac{2}{3} \times L(10) = \frac{2}{3} \times \frac{16384}{19683} \times L = \frac{32768}{59049}L$$

$$L(12) = \frac{2}{3} \times L(11) = \frac{2}{3} \times \frac{32768}{59049} \times L = \frac{65536}{177147}L \rightarrow L(12) \times 2 = \frac{131072}{177147}L$$

- 5.** La gamme est construite grâce aux cycles des quintes. Elle permet de déterminer la correspondance entre les cordes et les notes à l'aide du tableau de l'activité 3.



Exercice 7 : Gamme et transposition

Compétence principalement travaillée : Calculer des puissances et des quotients en lien avec le cycle des quintes.

Correction :

1. Le nouvel enchaînement des notes sera : *ré* ; *fa* ; *do*
2. L'intervalle dans la gamme de Pythagore n'est pas constant.
3. L'intervalle dans la gamme de Pythagore n'est pas constant donc, comme la perception auditive est due à l'intervalle entre les notes, la transposition dans la gamme de Pythagore change la perception du morceau.
4. L'intervalle dans la gamme tempérée est constant donc, comme la perception auditive est due à l'intervalle entre les notes, la transposition dans la gamme tempérée ne change pas la perception du morceau.
5. La gamme tempérée permet de transposer des morceaux de musique.

4.3. Le coin des experts

Exercice 8 : à la recherche du grave (d'après bac S, métropole 2013)

Compétence principalement travaillée : Extraire les informations utiles, construire une analyse quantitative.

Correction :

$$1. \quad f(Mi_0) = \frac{1}{(2L_0)} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$
$$f(Do_{-1}) = \frac{1}{(2L_{-1})} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

La masse linéique et la tension de la corde pour les deux cordes jouant les note Mi_0 et Do_{-1} sont les mêmes donc : $L_0 \times f(Mi_0) = L_{-1} \times f(Do_{-1})$. Ainsi :

$$L_{-1} = L_0 \times \frac{f(Mi_0)}{f(Do_{-1})}$$
$$= 1,05 \times \frac{41,2}{16,3}$$
$$= 2,65 \text{ m.}$$

La corde doit mesurer 2,65 m pour émettre la note do_{-1} .

2. La corde est très grande ce qui complexifie la tâche du luthier.
3. Pour diminuer la longueur de la corde, le luthier peut jouer sur la tension de la corde en l'augmentant et en la diminuant.

Exercice 9 : Tuyau d'orgue (d'après bac S, Antilles / Guyane septembre 2018)

Compétence principalement travaillée : Utiliser la racine douzième de 2 pour partager l'octave en douze intervalles égaux

Correction :

- La hauteur d'un son est caractérisée par la fréquence de sa note fondamentale. D'après la formule donnée dans l'exercice, la fréquence de la note fondamentale est proportionnelle à la racine carré de la température de l'air (en supposant que toutes les autres grandeurs sont constantes). Donc, plus la température de l'air est haute plus la fréquence est grande et donc plus la hauteur du son est importante : le son produit est plus aigu.

L'intervalle entre deux notes jouées par un tuyau à 20°C et un tuyau à une température supérieure de 10°C se calcule tel que :

$$\frac{f(T+10)}{f(T)} = \sqrt{\frac{T+10}{T}} = \sqrt{\frac{(273,15 + 20 + 10)}{(273,15 + 20)}} = 1,017$$

5.1. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 1 : Des notes à l'octave

Cet exercice passe du niveau apprentis, dans le manuel papier, au niveau initiés dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Maîtriser les notions de cours

Introduction : Pablo et Thimothée jouent simultanément avec leur flûte alto et sopranino une note. Amira, qui les écoute, certifie qu'ils ont joué la même note. Après recherches, il s'avère que Pablo a joué un *La₂* de fréquence $f_1 = 220$ Hz.

Questions :

1. Après avoir rappelé la définition d'une octave, déterminer la fréquence de la note jouée par Thimothée, sachant qu'elle se situe trois octaves plus haut.
2. Justifier pourquoi, d'un point de vue mathématique, ces notes ne sont pas dissonantes.

Correction :

1. Une octave correspond à l'intervalle, c'est-à-dire un rapport des fréquences entre deux notes, égal à 2. La fréquence d'une note à l'octave est donc le double de la fréquence de la note de référence.

Trois octaves plus haut qu'une note de fréquence f_1 , la note aura une fréquence f_2 telle que : $f_2 = 2^3 \cdot f_1 = 8 \cdot f_{1,1}$.

Ici, $f_2 = 220 \times 8 = 1\ 760$ Hz.

2. Ces notes ne sont pas dissonantes car l'intervalle entre ces deux notes est un

rapport arithmétique simple : $\frac{f_2}{f_1} = \frac{8}{1}$ (voir activité 2 p 203).

Exercice 4 : Un cycle infini ?

Cet exercice passe du niveau initiés, dans le manuel papier, au niveau experts dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Mettre en place un raisonnement mathématique pour prouver que le cycle des quintes est infini

Introduction :

On sait que la gamme pythagoricienne est décalée d'un comma par rapport à l'octave. Existe-t-il une suite de quintes qui permet d'obtenir l'octave ?

Questions :

1. Traduire mathématiquement l'égalité entre la n-ième quinte et la p-ième octave.
2. Sachant qu'une puissance de 3 est forcément impaire, répondre à la problématique de l'énoncé.

Correction :

1. Une quinte se définit par un rapport entre deux notes de $\frac{3}{2}$, une octave d'un rapport de 2. D'après ces définitions, l'égalité demandée se traduit mathématiquement par la formule : $\left(\frac{3}{2}\right)^n = 2^p$.
2. De l'égalité précédente, on déduit : $3^n = 2^{p+n}$.

D'après l'énoncé, une puissance de 3 est impaire, et une puissance de 2 est forcément paire. Il n'existe donc aucun couple de valeurs de n et p qui puisse vérifier cette égalité. On en conclut qu'il n'existe pas de suite de quintes qui permette d'obtenir une octave, quelles que soient les fréquences des notes considérées.



Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 13 : Le son, une information à coder

Introduction

Présentation

Ce chapitre se situe dans la partie *Son et musique, porteurs d'information*, et va permettre de réinvestir les connaissances et les capacités travaillées dans les chapitres précédents, ainsi dans le programme de Sciences numériques et technologie de 2nde.

Il cible certains objectifs du préambule du programme officiel :

- Donner un éclairage sur le développement des sciences et des technologies dans la modification de nos conditions de vie et de notre société.
- Nourrir le jugement critique et rencontrer des préoccupations d'ordre éthique.

Il permet pleinement de répondre aux buts de l'enseignement scientifique :

- Contribuer à faire de chaque élève une personne lucide, consciente de ce qu'elle est, de ce qu'est le monde et de ce qu'est sa relation au monde ;
- Contribuer à faire de chaque élève un citoyen ou une citoyenne responsable, qui connaît les conséquences de ses actions sur le monde et dispose des outils nécessaires pour les contrôler ;
- Contribuer au développement en chaque élève d'un esprit rationnel, autonome et éclairé, capable d'exercer une analyse critique face aux fausses informations et aux rumeurs.

Les élèves vont mobiliser des compétences transversales telles que travailler l'expression orale, faire des calculs, utiliser les bonnes unités, etc.

Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

- Cycle 4 :
 - Signaux sonores
 - Décrire les conditions de propagation d'un son ;
 - Notion de fréquence : sons audibles.
 - Signal et information
 - Comprendre que l'utilisation du son permet d'émettre, de transporter un signal donc une information.
- Classe de 2nde, programme de sciences physiques :
 - Ondes et signaux
 - Émission et propagation d'un signal sonore : Signal sonore périodique,



- fréquence ;
- Perception du son : lien entre fréquence et hauteur ; lien entre forme du signal et timbre ; lien qualitatif entre amplitude, intensité sonore et niveau d'intensité sonore.
- Classe de 2de, programme de Sciences Numériques et Technologique
 - Internet ;
 - Réseaux pair-à-pair ;
 - Les données structurées et leur traitement ;
 - Identifier les principaux formats et représentations de données.

Sitographie

- http://www.ostralo.net/3_animations/swf/echantillonnage.swf
Des animations sur l'échantillonnage.
- <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/numerisation-acoustique-Chareyron2.xml>
Influence de l'échantillonnage : objectif (ré-échantillonner des sons avec des fréquences différentes et les écouter).
- <http://www.speedtest.net/fr>
Évaluer les débits montants et descendants sur votre ligne Internet.

Activité 1 : Du son analogique au son numérique (documentaire)

1.1. Généralités

Cette activité est essentielle car elle conditionne la compréhension de la numérisation et les contraintes qui en découlent. Il faut donc s'assurer que la démarche ait été bien comprise.

L'élève doit bien comprendre la différence un signal analogique et un signal numérique pour ensuite en analyser les propriétés.

L'activité peut être réalisée comme une activité expérimentale par un groupe classe ou au niveau du bureau du professeur. Quoi qu'il en soit, il est conseillé que la partie expérimentale ne soit pas occultée pour une meilleure appropriation du sujet par les élèves.

Objectifs notionnels :

- Pour numériser un son, on procède à la discrétisation du signal analogique sonore (échantillonnage et quantification) ;
- Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et la quantification est fine, plus la numérisation est fidèle, mais plus la taille du fichier audio est grande.

Objectifs méthodologiques :

- Justifier le choix des paramètres de numérisation d'un son.

Durée : Environ 45 min.



**Autres compétences mobilisables dans cette activité :**

- Lire et analyser un graphique s'exprimer correctement en utilisant un vocabulaire scientifique adapté ;
- Utiliser des outils numériques.

1.2. Présentation des documents et réponses aux questions

Les documents présentent une modélisation de la conversion d'un signal analogique en un signal numérique.

Une fois la distinction bien établie entre ces deux types de signaux, il s'agit d'étudier différents paramètres, pris séparément :

- L'échantillonnage ;
- La quantification ;
- Et d'en comprendre le paramétrage.

Sources :

- Logiciel Audacity sous licence libre: <https://www.audacityteam.org/>.

Ressources complémentaires :

- La numérisation en image : <https://www.youtube.com/watch?v=bkDBFKwSEUo>.

Réponses attendues aux questions :

- 1. Un signal est dit analogique s'il varie de façon continue au cours du temps.
Le signal sonore émis par l'instrument de musique ainsi que le signal converti en un signal électrique par le micro sont des signaux analogiques
Un signal sera numérique s'il varie par paliers. Ainsi, à la sortie de la carte son (signal par palier), ou dans l'ordinateur (signal binaire), les signaux sont numériques.
- 2. Le rôle de la carte son est de convertir un signal analogique continu en un signal numérique.
- 3. Lorsque la fréquence d'échantillonnage augmente, le signal est de plus en plus superposable c'est à dire similaire au signal initial.
- 4. Lorsque la quantification augmente, le signal est de plus en plus proche du signal initial.
- 5. D'après le document 3, on remarque que lors de la numérisation, il existe un découpage horizontal et vertical du signal analogique. Le découpage horizontal dépend de la fréquence d'échantillonnage et le découpage vertical dépend du niveau de quantification. Plus ces deux paramètres sont élevés, plus le signal numérisé sera fidèle au signal analogique d'origine.





Activité 2 : Stocker des fichiers sons (documentaire)

2.1. Généralités

Cette activité peut certes paraître technique en termes de vocabulaire. Les élèves de 1re ayant tous suivi un enseignement en sciences numériques et technologique en seconde, ainsi que des activités sur le numérique en sciences physiques, ils ont donc la culture nécessaire pour appréhender convenablement cette partie cette partie du programme.

L'activité a pour objectif de familiariser l'élève avec les notions de compression, de débit Internet et les aider à comprendre les problématiques relatives au stockage de l'information.

Objectifs notionnels :

- Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et la quantification est fine, plus la numérisation est fidèle, mais plus la taille du fichier audio est grande.

Objectifs méthodologiques :

- Estimer la taille d'un fichier audio ;
- Justifier le choix des paramètres de numérisation d'un son.

Durée : Il faut rester large et prendre le temps d'accompagner les élèves sur ce vocabulaire technique. Prévoyez environ 30 min.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- La maîtrise des unités (bits, octets) est mobilisée ainsi que puissances de 10 en mathématiques ;
- Les élèves travailleront également la communication en utilisant un vocabulaire scientifique adapté.

2.2. Présentation des documents et réponses aux questions

Les documents sont réduits au minimum.

L'objectif n'est pas centré sur l'extraction d'informations, mais plutôt leur exploitation. Les élèves auront à mobiliser le vocabulaire, s'en approprier correctement le sens et faire par ailleurs quelques calculs.

Réponses attendues aux questions :

- *1. Rappel : la fréquence d'échantillonnage est le nombre de valeurs numériques liées au signal prélevé par seconde. La quantification ici est le nombre de bits attribué à chaque donnée.*
Ainsi, par seconde, pour calculer la taille du fichier, il suffit de multiplier la fréquence d'échantillonnage par la quantification. Et cela, sur chaque voie.
Finalement : Pour calculer la taille d'un fichier numérique totale, il faut multiplier sa fréquence d'échantillonnage par la quantification. Il faut multiplier ensuite par la durée et le nombre de voies.





- **2.** Pour une seconde d'un CD audio : Taille du fichier : $T = 44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times 1 \times 2$ (s'il a été enregistré sur 2 voies) = $1,41 \cdot 10^6$ bit soit 1,41 Mbit.
Sachant que 1 octet = 8 bit, alors : Taille du fichier = $1,41 \text{ Mbit} / 8 = 0,176 \text{ Mo}$.
- **3.** La taille du CD est de 700 Mo.
On en déduit la durée de stockage : $\Delta t = 700 / 0,176 = 3971 \text{ s}$
Donc, sur CD, on pourra stocker environ 3971 secondes d'enregistrement, soit environ 1 heure et 6 minutes.
- **4.** Le fichier HRA a une fréquence d'échantillonnage de 192 kHz et une quantification de 24 bits.
Taille T d'un fichier de 1 seconde : $T = 192 \cdot 10^3 \times 24 \times 1 \times 2 = 9,22 \cdot 10^6$ bits = 9,22 Mbits = 1,15 Mo.
Durée de stockage sur un CD : $\Delta t = 700 / 1,15 = 608$ secondes soit un peu plus de 10 min.
Ce format haute résolution n'est donc pas adapté au stockage sur un CD car la durée d'enregistrement paraît trop faible.
Ce format sera réservé au professionnel pour une qualité de musique supérieure. Il sera nécessaire de stocker les données sur un autre support qu'un CD : disque dur par exemple.

2.3. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Un ordinateur ;
- Des données audios stockées sur celui-ci.

Protocole :

Il pourra donc, selon votre organisation, être réalisé en classe, ou à la maison sous forme d'exercices. Il s'agit d'effectuer les mêmes calculs qu'au cours de cette activité.

L'objectif est également de commencer à comprendre qu'une compression est très souvent réalisée (surtout sur les enregistrements provenant de données streamées : youtube ou autre plateforme).

Résultats attendus / documents de secours :

Selon le fichier, les calculs de données de stockage seront identiques (cas d'un fichier non compressé (exemple : provenant d'un CD) ou beaucoup plus grande si les données ont été compressées. Vous pourrez ainsi introduire l'activité suivante.

Activité 3 : La compression des fichiers (documentaire)

3.1. Généralités

L'objectif de cette activité est de découvrir et de comprendre l'intérêt de la compression des données dans le domaine de l'audio.

Elle est dans un premier temps uniquement qualitative, aucun calcul n'est attendu.



Le vocabulaire est simple afin que chaque élève puisse bien en comprendre le principe. Les situations sont des situations réelles pour que vos élèves puissent se projeter et exercer leur esprit critique.

Objectifs notionnels :

- La compression consiste à diminuer la taille d'un fichier afin de faciliter son stockage et sa transmission ;
- Les techniques de compression spécifiques au son, dites « avec perte d'information », éliminent les informations sonores auxquelles l'oreille est peu sensible.

Objectifs méthodologiques :

- Comparer des caractéristiques et des qualités de fichiers audio compressés.

Autre compétence mobilisable dans cette activité :

- Cette activité est une occasion de travailler la communication à l'oral.

Durée : Environ 30 minutes.

3.2. Présentation des documents

Les documents ont été choisis pour que les élèves puissent trouver des informations qui leur parlent. Il n'est pas nécessaire qu'ils connaissent tous les formats de compression, mais simplement qu'ils en reconnaissent quelques-uns. Les rassurer sur ce point peut être utile.

Réponses attendues aux questions :

- **1.** Un tri et une organisation des informations sera nécessaire pour répondre à la question.

Éléments à extraire :

- « Envoyer par internet » : d'après le doc 4, la compression destructrice est utilisée « pour permettre d'envoyer le flux d'information en temps réel ».
- Mais, toujours d'après le doc 4 : « les professionnels du son vous le diront... la compression destructive est une calamité ».
- D'après le doc. 3 : les formats avec perte utilisent les caractéristiques du son, mais également de l'ouïe (le fameux modèle psychoacoustique). Ainsi, pour un public non professionnel, ce type de compression de fichiers pourra tout de même convenir à une bonne écoute.

Finalement, on attend dans cet exposé oral que :

- Les notions de son numérique (réinvestissement des activités précédentes) et de compression (dans cette activité) soient clairement définies.
- Les élèves indiquent qu'une compression destructrice sera nécessaire pour des transferts par Internet.
- Cette compression sera acceptable pour le grand public, mais que les professionnels trouveront ce son est de qualité insuffisante.





Conclusion: si « votre ami » n'a pas d'exigences de qualité sonore d'audiophile averti, le transfert des fichiers audio en format MP3 par exemple, ou AAC devrait convenir.

- **2. Synthèse permettant d'envisager une vision plus globale et de réfléchir sur la qualité audio des fichiers compressés.**

Éléments de réponse:

- Le fichier a été compressé par des techniques destructrices afin de les rendre plus légers et de faciliter leur échange par Internet.
- Tant que les conditions d'audition ne dépassent pas une certaine exigence, le son sera considéré de qualité acceptable car ces techniques ne suppriment que les fréquences les moins audibles par l'oreille humaine.

Conclusion : si la chaîne HIFI peut restituer les sons avec une très grande qualité, alors il est possible que les fichiers ne contiennent pas assez d'informations puisque certaines subtilités restituables par le système de son du son ne soient pas entendues. Cette perte de qualité peut être décelable.

Activité 4 : La qualité des fichiers audio (documentaire)

4.1. Généralités

Les techniques de compression des fichiers ayant été traitées dans l'activité précédente, il s'agit ici de faire des calculs et de déterminer des taux de compression.

Le but sera de prendre conscience que 2 paramètres interviennent sur la qualité sonore: le taux de compression et les techniques de compression.

Objectifs notionnels :

- La compression consiste à diminuer la taille d'un fichier afin de faciliter son stockage et sa transmission ;
- Les techniques de compression spécifiques au son, dites « avec perte d'information », éliminent les informations sonores auxquelles l'oreille est peu sensible.

Objectifs méthodologiques :

- Calculer un taux de compression ;
- Comparer des caractéristiques et des qualités de fichiers audio compressés.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Faire des calculs ;
- Donner un résultat avec son unité.

Durée : Environ 40 min.





4.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

Comme les documents des autres activités, ils sont courts et contiennent les informations essentielles afin que les élèves puissent rapidement effectuer des calculs.

Les élèves doivent mobiliser les connaissances acquises au cours activités précédentes pour calculer les taux de compression. Il serait intéressant de traiter les exercices de façon différenciées afin de prendre en compte l'hétérogénéité de votre classe.

Réponses attendues aux questions :

- **1.** En format wav :
Taille du fichier = fréquence d'échantillonnage × quantification × durée en seconde × nombre de voies
Donc : taille du fichier = $44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times (2 \times 60) \times 2 = 1,69 \cdot 10^5$ bit = 169 Mbit

Puisque 1 octet = 8 bits :
Taille du fichier = $169/8 = 21,1$ Mo
Le document indique une taille un peu plus grosse liée au stockage de différents autres paramètres.
- **2.** La taille du fichier non compressé a été calculée question 1 , il correspond au format WAV.
Dans le tableau du doc 2, on lit la taille du fichier pour la même durée dans le format compressé.
 - Pour le format MP3 128kbits/s
 $Q = 21,1/1,9 = 11$.
Le taux de compression est de 1 pour 11.
 - Pour le format MP3 320kbits/s
 $Q = 21,1/4,8 = 4$ si on arrondit à l'unité.
Le taux de compression est de 1 pour 4.
- **3.** Pour un taux de compression de 1 pour 11, la qualité est seulement de 1 étoile, alors qu'elle est de 3 étoiles pour un taux de 1 pour 4. On vérifie bien que plus un fichier est compressé, plus on perd en qualité sonore.
- **4.** En format AAC 320 kbits/s, le taux de compression sera le même qu'en format MP3 320 kbits/s car la taille du fichier est identique. En revanche, d'après le tableau, la qualité du son est bien meilleure. Cela s'explique par la technique de compression qui est différente. En effet, d'après le doc. 1, le format AAC est une technique de compression plus performante qui permet de réduire la taille du fichier, en gardant une meilleure qualité sonore.





- **5.** Cette question permet de synthétiser les réponses et de mieux comprendre les techniques de compression.

Les paramètres ayant une influence sur la qualité du son sont de 2 ordres :

- Le taux de compression pour une technique donnée: plus le quotient de compression sera fort, plus le fichier sera petit, et moins la qualité sera grande.
- La technique de compression : selon les paramètres choisis par les algorithmes pour réduire les données les moins nécessaires, la qualité sonore sera différente à taux de compression égal.

Activité 5 : Le streaming (activité de groupe)

5.1. Généralités

Le streaming: tout le monde en parle. Et pourtant. Les élèves savent-ils exactement de quoi il s'agit? Est ce légal? Illégal?

Le but de cette activité est de comprendre ce qu'est le streaming et d'en saisir les conséquences sur notre société.

Elle permet également de réinvestir les notions de compression de fichier, et de qualité du son vues dans les activités précédentes.

Objectifs notionnels :

- Histoire enjeux et débats: Les enjeux culturels et économiques de la numérisation et de la compression des sons.

Objectifs méthodologiques :

- Cette activité permet d'atteindre un but précis : contribuer à faire de chaque élève un citoyen ou une citoyenne responsable, qui connaît les conséquences de ses actions sur le monde et dispose des outils nécessaires pour les contrôler.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- S'exprimer à l'oral.

Durée : Environ 50 minutes.

5.2. Présentation des documents

5.2.1. Groupe 1

Présentation des documents :

- **Document 2 :** Qu'est ce que le streaming, quel est le cadre légal ? Il s'agit également de rappeler ce qu'est le droit d'auteur.





- **Document 3** : Ce document liste les avantages et les inconvénients du streaming, pour l'auteur et pour l'utilisateur.

Indicateurs de réussite :

- Intérêts de ce modèle de diffusion :
 - Le streaming facilite l'accès à la culture.
 - Permet à des artistes de se faire connaître et de sortir de l'anonymat (Les revenus des musiciens ne sont pas issus que de leur vente de leur musique).
 - Le streaming est facilement accessible car les techniques se sont multipliées.
- Limites de ce modèle de diffusion :
 - Pour l'auteur : les droits d'auteur sont-ils bien calculés en accord avec le nombre d'écoute.
 - Le nombre de plateforme illégale s'est multiplié, les artistes ne sont plus rétribués.
 - Pour l'utilisateur de streaming payant : pas de possibilité de garder le contenu. Si il cesse son abonnement, il perd ses musiques.
 - Pas de téléchargement, donc pas de stockage.

Sources :

- Article sur la loi « HADOPI » : Haute Autorité pour la Diffusion des Œuvres et la Protection des droits Internet. Il s'agit d'une institution dédiée à la diffusion des œuvres et la protection des droits sur internet.

5.2.2. Groupe 2

Présentation des documents :

- **Document 4** : Il présente l'évolution des techniques de compression et de diffusion qui expliquent les raisons pour lesquelles le streaming s'est fortement développé.
- **Document 5** : Il rappelle le cadre légal et les raisons pour lesquelles le streaming est encadré.

Indicateurs de réussite :

- Intérêts de ce modèle de diffusion :
 - Forte augmentation de la qualité des titres en streaming grâce à l'évolution des techniques.
 - Développement de nombreuses plateformes, donc public concerné plus large.
 - De nombreux contenus maintenant disponibles : radio, webradio (de votre établissement par exemple), musiques, et films.
 - Un cadre légal qui se développe grâce à des plateformes payantes, ou des plateformes qui partagent du contenu non soumis à des droits d'auteur.
- Limites de ce modèle de diffusion :
 - Pas de limite proposée dans les documents 4 et 5.





Exercices

6.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : L'échantillonnage

Compétence principalement travaillée : Utiliser les bonnes unités.

Correction :

1. Le signal analogique est le signal continu à l'écran. Sa période T est de 6 ms, sa fréquence est donc $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{6 \times 10^{-3}} = 166 Hz$.

2. La fréquence d'échantillonnage est le nombre de mesures effectuées par seconde.

3. À l'aide du document, on compte le nombre de valeurs prélevées au cours des 6 ms. Il y a 24 points.

$$\text{On en déduit : } f_e = \frac{24}{6 \times 10^{-3}} = 4 \times 10^3 Hz$$

La fréquence d'échantillonnage est donc de 4 000 Hz.

4. Pour rendre la numérisation plus fidèle, il faut soit augmenter le nombre de valeurs prélevées soit augmenter la fréquence d'échantillonnage.

5. La fréquence proposée est deux fois plus petite, il y aurait donc 2 fois moins de points prélevés, soit 12 points prélevés sur une durée de 6 ms.

Source(s) :

- http://www.ostralo.net/3_animations/swf/echantillonnage.swf
Animation sur l'échantillonnage et la quantification.
- http://a.bougaud.free.fr/TSphysique/P21_Resume_numerisation.html
Vidéo sur la numérisation de A. Bougaud.

Exercice 2 : Capacités de stockage des CD, DVD, clés USB

Compétence principalement travaillée : Faire des calculs et maîtriser les unités.

Correction :

1. Sur un CD :

Taille du fichier (bits) = fréquence d'échantillonnage × quantification × durée en seconde × nombre de voies

Le nombre de voies sera de 2, car le son est enregistré en stéréo.





Calcul de la taille du fichier T :

$$T = 44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times (4 \times 60) \times 2 \text{ (stéréo, donc 2 voies)} = 339 \cdot 10^6 \text{ bit}$$

$$\text{ou encore } T = \frac{339 \cdot 10^6}{8} = 42,3 \text{ Mo}$$

2. Durée en secondes = taille du fichier / (fréquence d'échantillonnage × quantification × nombre de voies)

Taille du fichier = 700 Mo = $700 \times 8 \text{ Mbits} = 5600 \text{ Mbits}$

$$d = \frac{5600 \cdot 10^6}{44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times 2} = 3968 \text{ s}$$

Donc la durée d'enregistrement d vaut : , soit 1h 6 min 8 s.

3. Paramètres CD : fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz, quantification 16 bits.

Paramètres DVD : fréquence d'échantillonnage de 48 kHz, quantification 3 octets soit 24 bits.

La fréquence d'échantillonnage, ainsi que la quantification sont meilleures pour le DVD : le son sera donc de meilleure qualité.

4. Taille des fichiers sur un DVD :

$$T = 48 \cdot 10^3 \times 24 \times (8 \times 3600) \times 2 = 66\,355 \text{ Mbits soit } 8294 \text{ Mo.}$$

Clé USB : 32 Go = $32 \cdot 10^3 \text{ Mo}$

$$n = \frac{32 \cdot 10^3}{8294} = 3,85$$

Nombre de DVD n stocké sur une clé :

Source(s) :

- <http://www.cea.fr/multimedia/pages/animations/technologies/lecteur-cd.aspx>
Animation interactive sur le lecteur CD.

Exercice 3 : La compression

Compétence principalement travaillée : Argumenter, faire des calculs, maîtriser les unités.

Correction :

1. La compression n'intervient pas sur la fréquence d'échantillonnage, ni sur la quantification.

2. Utilité de compresser un fichier : stockage plus faible sur un ordinateur, échange plus simple de données (clé USB, mail).

3. Quotient de compression = taille initiale / taille finale

Taille non compressée = fréquence d'échantillonnage × quantification × durée en seconde × nombre de voies = $44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times (3 \times 60) \times 2 = 254 \text{ Mbit} = 31,8 \text{ Mo}$

Quotient de compression : $31,8 / 2 = 16$.

Le taux de compression est donc de 1 pour 16.

Remarque : ce taux de compression élevé peut détériorer sensiblement la qualité audio.





6.2. Le repaire des initiés

Exercice 4 : Utiliser son téléphone portable

Compétence principalement travaillée : Exercer son esprit critique.

Correction :

Trouvons des arguments scientifiques :

- La fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la plus grande fréquence du signal pour que le signal soit lisible et fidèle (critère de Shannon).
- La qualité de la numérisation sera d'autant plus grande que la quantification sera grande.

Dans le cas de la téléphonie mobile, la fréquence d'échantillonnage est de 8 kHz (ce qui est faible, mais permet de ne coder qu'une petite quantité de données et donc de faciliter les échanges). Elle sera donc fidèle pour des fréquences jusqu'à 4 KHz car il faut que la fréquence d'échantillonnage soit deux fois supérieure à la fréquence maximale.

Cette fréquence sera suffisante pour comprendre un interlocuteur, mais elle est trop faible pour reproduire fidèlement les sons émis par les instruments de musique.

La quantification est également faible : 8 bits, alors qu'elle est, par exemple de 16 bits pour les CD. Conclusion : les paramètres de téléphonie mobile (fréquence d'échantillonnage et quantification) ne permettent pas une bonne restitution des sons émis par les instruments de musique.

La qualité du concert était donc peut être très bonne, mais vous n'avez pas pu partager cet instant musical pleinement avec votre ami. Il peut avoir des regrets de ne pas y être allé !

Exercice 5 : Enregistrer le son d'un piano

Compétence principalement travaillée : Argumenter, faire des calculs, maîtriser les unités.

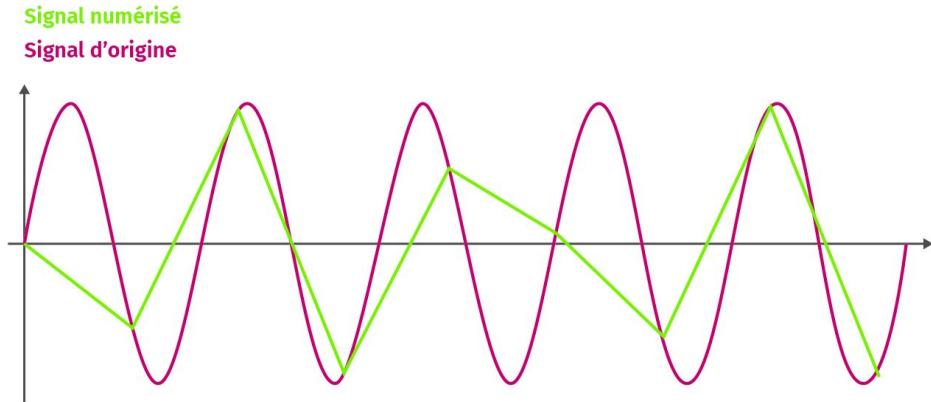
Correction :

1. La fréquence d'échantillonnage doit être au minimum deux fois plus grande que la fréquence du signal. Il faudra donc choisir au moins 8 400 Hz.





2. Si la fréquence d'échantillonnage est trop basse, alors le signal numérisé ne sera pas fidèle au signal du départ.



3. Une fréquence d'échantillonnage de 44,1kHz est plus de 10 fois plus grande que la fréquence initiale : c'est une bonne fréquence d'échantillonnage.

4. On cherche la quantification :

$$\text{Quantification} = \frac{\text{taille du fichier}}{\text{fréquence d'échantillonage} \times \text{durée en secondes} \times \text{nombre de voies}}$$

Taille du fichier = 3 Mo soit 24 Mbit

$$\text{Quantification} = \frac{24 \cdot 10^6}{44,1 \cdot 10^3 \times 30 \times 2} = 9 \text{ bit}$$

La quantification devra se faire sur 9 bits, c'est à dire $9/8 = 1,125$ octet.

5. Pour réduire la taille du fichier sans modifier le paramétrage des logiciels, il faudra utiliser une technique de compression des données.

Source(s) :

- http://www.ostralo.net/3_animations/swf/echantillonnage.swf
Des animations sur la fréquence d'échantillonnage.

6.3. Le coin des experts

Exercice 6 : Choisir sa clé USB

Compétence principalement travaillée : Construire un raisonnement et faire des calculs.

**Correction :**

1. Temps nécessaire pour enregistrer votre album de musique préférée :

- Pour une clé USB 2.0 , il faudra $700 / 60$ soit environ 12 secondes.
- Pour une clé USB 3.0, il faudra $700 / 600$, soit environ 1 seconde.

2. Il faut calculer la taille du fichier qui est transféré sur la clé USB.

Calculer la taille du fichier avec les caractéristiques données pour une qualité CD.
Puis comparer les deux tailles.

Taille du fichier transféré sur la clé : $60 \times 3,5 = 210$ Mo

Taille du fichier qualité CD = fréquence d'échantillonnage × quantification × durée en seconde x nombre de voies = $44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times (40 \times 60) \times 2 = 3\,386$ Mbit

Ce fichier a une taille de : $3\,386$ Mbit / 8 = 423 Mo

210 Mo < 423 Mo, le fichier a donc été compressé.

3. Taux de compression : taille initiale/taille finale = $423 / 210 = 2$.

Le taux de compression est de 1 : 2

Ce taux ne modifiera pas grandement la qualité du fichier audio.

Exercice 7 : Format 3G, 4G ou 5G

Compétence principalement travaillée : Effectuer des calculs, argumenter.

Correction :

1. Avec ce taux de compression, la taille du fichier compressé est 22 fois plus petite que la taille du fichier initial. Il a donc été compressé avec un fort taux, ce qui entraîne une qualité sonore limite.

2. Taille initiale : d'après le tableau, 1 minute de son au format CD a une taille de 85 Mbits. Ici, pour 5 minutes, taille initiale sera de 85 Mbits $\times 5 = 425$ Mbit.

Taille compressée : $425 / 22 = 19$ Mbit.

3. Quotient de compression : $Q = 25,8 / 4,3 = 6$.

Le taux de compression est donc 1 : 6.

4. La taille du fichier de 5 minutes non compressé est de 425 Mbit.

La taille du fichier compressé est de 19 Mbits.

En technologie 3G, le débit est de 7,22 Mbit par seconde.

Il faudra donc $425 / 7,22 = 59$ secondes pour le téléchargement du fichier non compressé et $19 / 7,22 = 2,6$ s pour le fichier compressé.

En technologie 5G, le débit est de 100 Mbit par seconde.

Il faudra donc $425 / 100 = 4,25$ s pour le transfert du fichier non compressé et $19 / 100 = 0,19$ s pour le fichier compressé.

En conclusion, pour 5 minutes de musique, sans compression, la technologie 3G peut s'avérer inadaptée à de très gros fichiers, mais elle reste acceptable si le fichier a été compressé.

Pour la technologie 5G, les temps de transfert sont beaucoup plus courts, et la compression qui





implique de la perte d'information n'est peut-être pas nécessaire dans des cas usuels.

7.1. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

Exercice 3 : La compression

Cet exercice passe du niveau apprenti, dans le manuel papier, au niveau expert dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Calculer un taux de compression.

Questions :

Vous disposez d'un fichier audio, en qualité CD, de 3 min (sous le format wav par exemple, échantillonner à 44,1 kHz, sur 16 bits en stéréo). A l'aide d'un logiciel, vous compressez votre fichier en format MP3 128 kbit/s (format avec perte d'information). 128 kbits d'information sont stockées par seconde.

Données: 1 octet = 8 bits

1. Quelle est la taille du fichier en format wav ?
2. Quelle sera la taille du fichier compressé en format MP3 128 kbit/s ?
3. Calculer le taux compression.
4. Le fichier compressé sera-t-il de bonne qualité ?

Correction :

1. Taille non compressée = fréquence d'échantillonnage × quantification × durée en seconde × nombre de voies = $44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times (3 \times 60) \times 2 = 254 \times 10^5 = 254 \text{ Mbit} = 31,8 \text{ Mo}$.
2. Pour un fichier de 3 min, la taille T du fichier audio compressé en format 128 kbit/s est :
 $T = 128 \times 3 \times 60 = 2,3 \cdot 10^4 \text{ kbit} = 23 \text{ Mbit}$.
3. Quotient de compression Q = taille initiale / taille finale : $Q = 254 / 23 = 11$.
Le taux de compression est de 1 : 11.
4. Le taux de compression est assez élevé, ce qui devrait impacter la qualité du fichier son d'origine.

Exercice 5 : Enregistrer le son d'un piano

Cet exercice passe du niveau initié, dans le manuel papier, au niveau apprenti dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Justifier les choix des paramètres de numérisation d'un son.



**Questions :**

On considère un signal sonore à numériser de fréquence 4 200 Hz émis par un piano. Vous souhaitez réaliser un enregistrement stéréo de 30 secondes.

1. Quelle fréquence d'échantillonnage devez-vous choisir au minimum pour que la reproduction du son soit fidèle ?
2. Si le pianiste joue d'autres notes plus graves, cette fréquence d'échantillonnage reste-t-elle adaptée ?
3. La numérisation du signal a été effectuée mais le fichier est trop grand pour la capacité de stockage. Quelle solution peut-être envisagée ?

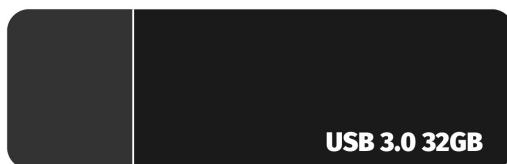
Corrections :

1. La fréquence d'échantillonnage doit être au minimum deux fois plus grande que la fréquence du signal. Il faudra donc choisir au moins 8 400 Hz.
2. Si les autres notes sont plus graves c'est que leur fréquence est plus faible. La fréquence d'échantillonnage précédente reste donc bien adaptée car elle reste au moins deux fois plus grande.
3. La solution qui peut être envisagée est de compresser le son avec un logiciel adapté afin de diminuer la taille du fichier qui sera stocké. Il conviendra de choisir un taux de compression pas trop élevé pour ne pas perdre en qualité de rendu sonore.

Exercice 6 : Choisir sa clé USB

Cet exercice passe du niveau expert, dans le manuel papier, au niveau initié dans le manuel numérique.

Compétence principalement travaillée : Faire des calculs et construire un raisonnement.

Documents :

| Version | Vitesse de transfert | Capacité |
|---------|----------------------------|----------|
| USB 3.0 | Jusqu'à 600 Mo par seconde | 32 Go |

Note : le port USB de votre appareil doit être adapté pour atteindre ces vitesses de transfert.

**Source :**

- Tableau : <https://www.generation-nt.com>

Questions :

Un petit décodage : lorsque vous achetez une clé USB, le plus souvent, vous ne vous intéressez qu'à sa capacité de stockage (ici, sur la photo : 32 GB (32 Gigabytes)). Pourtant, il existe différentes versions de clé USB (ici, sur la photo, c'est une version 3.0) qui correspondent à des vitesses de transfert différentes.

Note: 1 byte = 1 octet

1. Si vous stockez uniquement de la musique en format wav sur votre clé (échantillonné sur 16 bits à une fréquence d'échantillonnage de 44,1 kHz, en stéréo), quelle durée de fichiers audio pouvez-vous stocker sur votre clé ?
2. Combien de temps seront nécessaires pour transférer ces fichiers wav sur votre clé ?
3. Vous avez compressé vos fichiers en format MP3, avec un taux de compression de 1 : 5. Quelle durée de fichiers audio pouvez-vous stocker ?

Correction :

1. $32 \text{ Gbytes} = 32 \text{ Go} = 256 \text{ Gbit} = 256 \cdot 10^9 \text{ bit}$

Taille du fichier non compressée = fréquence d'échantillonnage \times quantification \times durée en seconde \times nombre de voies

On en déduit :

$$\text{Durée} = \frac{\text{capacité de la clé}}{\text{fréquence d'échantillonage} \times \text{quantification} \times \text{nombre de voies}}$$
$$\text{Durée} = \frac{256 \cdot 10^9}{44,1 \cdot 10^3 \times 16 \times 2} = 1,81 \cdot 10^5 \text{ s}$$

soit 50 h et 16 min environ.

2. D'après le tableau de données, la vitesse de transfert est de 600 Mo/s.

$$\Delta t = \frac{256 \cdot 10^9}{600 \cdot 10^6} = 427 \text{ s}$$

Le temps de transfert Δt sera donc : soit 7 min et 7 s environ.

3. Au format MP3 avec un taux de compression de 1 : 5, la durée sera 5 fois plus grande, elle sera donc de :

$$\text{Durée} = 1,81 \cdot 10^5 \times 5 = 9,05 \cdot 10^5 \text{ s}$$

soit une capacité d'écoute de 251 h et 20 min environ.





Livre du professeur - Enseignement Scientifique 1re

Chapitre 14 : Entendre la musique

Introduction

Présentation

Le chapitre 11 concernant le son en tant que phénomène vibratoire a pour premier objectif d'introduire le quatrième et dernier thème du programme d'enseignement scientifique du tronc commun de première. Il établit un lien avec les notions auparavant étudiées en classe de seconde en physique-chimie.

Ce chapitre permet en outre d'aborder le son principalement dans un contexte musical (et faire une brève introduction au chapitre 12), et ainsi faire lien avec la suite de l'ouvrage.

Il a pour objectif de revenir sur les grandeurs inhérentes aux sons périodiques (fréquence et période) et d'introduire les niveaux d'intensité sonore pour faire le lien avec le chapitre 14.



Ce qui est enseigné au cours des années précédentes

| | |
|--|---|
| Émission et propagation d'un signal sonore. | Décrire le principe de l'émission d'un signal sonore par la mise en vibration d'un objet et l'intérêt de la présence d'une caisse de résonance. |
| Vitesse de propagation d'un signal sonore. | Expliquer le rôle joué par le milieu matériel dans le phénomène de propagation d'un signal sonore. |
| | Citer une valeur approchée de la vitesse de propagation d'un signal sonore dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées. |
| | Mesurer la vitesse d'un signal sonore. |
| | |
| Signal sonore périodique, fréquence et période. | Définir et déterminer la période et la fréquence d'un signal sonore notamment à partir de sa représentation temporelle. |
| Relation entre période et fréquence. | Utiliser une chaîne de mesure pour obtenir des informations sur les vibrations d'un objet émettant un signal sonore. |
| | Mesurer la période d'un signal sonore périodique. |
| | Utiliser un dispositif comportant un microcontrôleur pour produire un signal sonore. |
| | Capacités mathématiques : identifier une fonction périodique et déterminer sa période. |
| | |
| Perception du son : lien entre fréquence et hauteur ; lien entre forme du signal et timbre ; lien qualitatif entre amplitude, intensité sonore et niveau d'intensité sonore. | Citer les domaines de fréquences des sons audibles, des infrasons et des ultrasons. |
| Échelle de niveaux d'intensité sonore. | Relier qualitativement la fréquence à la hauteur d'un son audible. |
| | Relier qualitativement intensité sonore et niveau d'intensité sonore. |
| | Exploiter une échelle de niveau d'intensité sonore et citer les dangers inhérents à l'exposition sonore. |
| | Enregistrer et caractériser un son (hauteur, timbre, niveau d'intensité sonore, etc.) à l'aide d'un dispositif expérimental dédié, d'un smartphone, etc. |



Activité 1 : L'oreille, organe de l'audition (documentaire)

1.1. Généralités

Cette activité explore des données d'anatomie et de physiologie afin d'expliquer comment on peut entendre grâce aux différentes parties de l'oreille, de la réception des ondes sonores par le pavillon jusqu'à l'échelle cellulaire avec les cellules ciliées générant le message nerveux.

Objectifs notionnels :

- L'oreille externe canalise les sons du milieu extérieur vers le tympan. Cette membrane vibrante transmet ces vibrations jusqu'à l'oreille interne par l'intermédiaire de l'oreille moyenne ;
- L'être humain peut percevoir des sons de niveaux d'intensité approximativement compris entre 0 et 120 dB ;
- Les sons audibles par les humains ont des fréquences comprises entre 20 et 20 000 Hz ;
- Dans l'oreille interne, des structures cellulaires (cils vibratiles) entrent en résonance avec les vibrations reçues et les traduisent en un message nerveux qui se dirige vers le cerveau ;
- Les cils vibratiles sont fragiles et facilement endommagés par des sons trop intenses.

Objectifs méthodologiques :

- Relier l'organisation de l'oreille externe et de l'oreille moyenne à la réception et la transmission de la vibration sonore ;
- Relier la structure des cellules ciliées à la perception du son.

Durée : Pour avoir le temps de répondre à toutes les questions proposées, cette activité nécessite une séance entière d'une heure, avec la diffusion de la vidéo incluse.

1.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Ce schéma permet de mettre en parallèle les différentes parties de l'oreille et le devenir d'un son : réception de la vibration d'air dans le conduit, transmission et amplification de cette vibration par les osselets, et vibration de la lymphe plus ou moins loin dans la cochlée selon la fréquence de la vibration, qui sera convertie en message nerveux.
- **Document 2** : Cette photographie permet de voir le tympan, membrane captant la vibration de l'air qui la transmet au marteau, que l'on voit par transparence.
- **Document 3** : Ce graphique montre l'ensemble des sons audibles selon leur fréquence et leur niveau sonore. On constate que le niveau sonore audible diminue fortement lorsque l'on va vers les fréquences extrêmes, par contre le seuil de douleur se situe vers 120 dB pour toutes les fréquences audibles.
- **Document 4** : Ce schéma montre de manière très simplifiée l'organisation et le fonctionnement de la cochlée. Les vibrations de la lymphe parcourent la cochlée depuis la fenêtre ovale jusqu'à la fenêtre ronde, et ces vibrations activent les cellules ciliées présentes dans une membrane centrale tout au long de la cochlée en fonction de leur fréquence. Les fréquences élevées activent les premières cellules tandis les fréquences basses activent les cellules ciliées situées à l'extrémité de la cochlée.



- **Document 5 :** Cette photographie montre les cils vibratiles des cellules ciliées. Les cils sont disposés de manière très particulière et ne mesurent que quelques micromètres. La légende indique que ce sont ces cellules qui convertissent les vibrations en message nerveux.
- **Document 6 :** La comparaison de ces deux photographies permettent de démontrer de manière très visuelle les dommages causés par un traumatisme sonore. Les nombreux cils détruits ne se renouvellent pas, entraînant les troubles auditifs.

Réponses attendues aux questions :

- 1. Le son est capté par le pavillon de l'oreille externe et fait vibrer la membrane du tympan. Cette vibration est transmise et amplifiée par 3 osselets jusqu'à la fenêtre ovale. Cette fenêtre va transmettre la vibration à la lymphe contenue dans la cochlée. La vibration de la lymphe se propagera plus ou moins selon sa fréquence et sera convertie en message nerveux.
- 2. L'oreille humaine peut percevoir des sons entre 5 dB et 120 db environ pour une fréquence de 1000Hz.
- 3. Les sons de haute fréquence vont activer les cellules ciliées près de la fenêtre ovale, au début de la cochlée, tandis que les sons de basse fréquence vont activer les cellules situées à l'extrémité de la cochlée.
- 4. La destruction des cellules ciliées empêche la conversion des vibrations issues du son en message nerveux, donc cette destruction peut entraîner une surdité. Les cellules ciliées ne se renouvellent pas, donc lorsqu'elles sont détruites, c'est de manière irréversible ; ainsi la surdité sera définitive le cas échéant.
- 5. La partie extérieure de l'oreille permet de capter les ondes sonores environnantes et l'oreille moyenne permet d'amplifier les vibrations lorsque le niveau sonore est très faible. Le fonctionnement de la cochlée permet de percevoir différentes fréquences, en fonction des zones de la cochlée activées.

Ressource complémentaire :

- <https://www.youtube.com/watch?v=k1W8lGbpwo>
Courte vidéo présentant le fonctionnement de l'oreille.

1.3. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Un ordinateur avec le logiciel Audacity.
- Une banque de sons téléchargeables ici :

Protocole :

- Télécharger les fichiers audio.
- Ouvrir le fichier avec Audacity
- Si le fichier comporte deux voies (voir image 1), séparer les deux voies (image 2) et n'en garder qu'une.
- Choisir l'option « Spectrogramme » (Image 3).





- Le sonogramme obtenu permet d'observer les variations de fréquence du son au cours du temps. Plus un son est aigu, plus sa fréquence est élevée. Plus un son est grave, plus sa fréquence est basse.

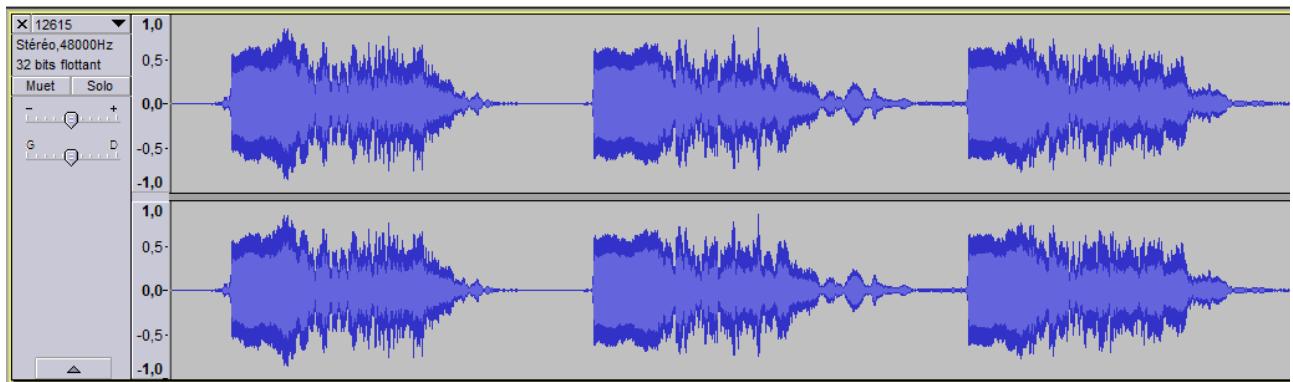


Image 1

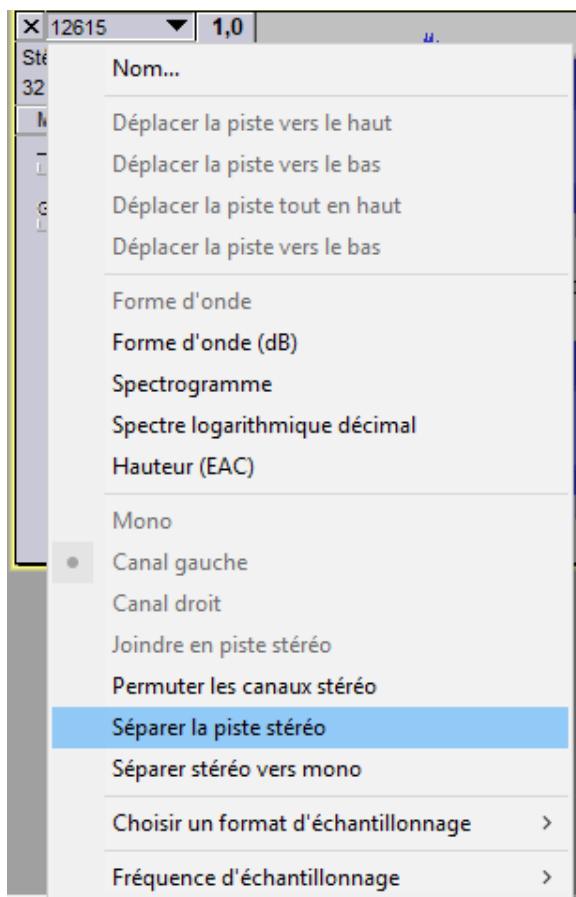


Image 2

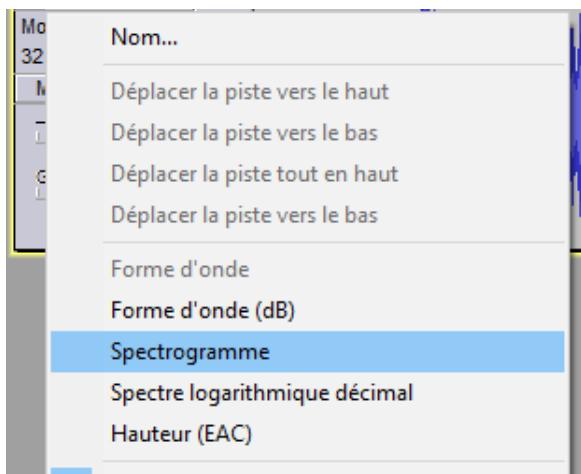


Image 3

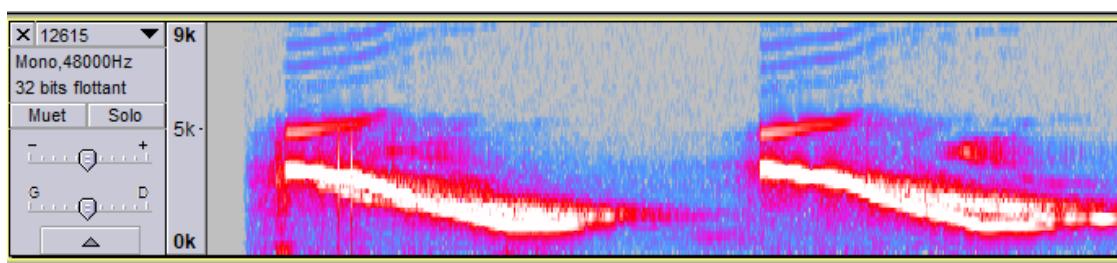


Image 4

Test de discrimination sonore :

- Télécharger les fichiers audio nécessaires au test.
- Écouter les fichiers les uns à la suite des autres et les classer du plus grave au plus aigu.
- Vérifier la validité du classement à l'aide du sonogramme.

Activité 2 : La perception sonore (documentaire)

2.1. Généralités

Cette activité est essentiellement basée sur l'exploration du fonctionnement cérébral, à l'aide d'IRMf, afin de localiser les zones responsables de la perception auditive, et en particulier la perception auditive de la musique. Elle permet aussi d'évaluer un exemple d'effet sur le cerveau de l'apprentissage de la musique.

Objectifs notionnels :

- Des aires cérébrales spécialisées reçoivent les messages nerveux auditifs ;
- Certaines permettent, après apprentissage, l'interprétation de l'univers sonore (parole, voix, musique, etc.).

**Objectifs méthodologiques :**

- Interpréter des données d'imagerie cérébrale relatives au traitement de l'information sonore.

Durée : Une demi-heure suffit car les documents sont très accessibles, mais le plus intéressant est de réaliser une activité avec le logiciel [eduanat2](#) : dans ce cas, il faut au moins une heure.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Utiliser un logiciel de visualisation d'imagerie cérébrale, comme eduanat2 ou [IRMf virtuelle](#).

2.2. Présentation des documents

Présentation des documents :

- **Document 1** : Texte présentant les origines possibles d'une surdité immédiate, notamment suite à un AVC.
- **Document 2** : Image tridimensionnelle présentant l'anatomie cérébrale, et en particulier situant les lobes du cerveau.
- **Document 3** : IRMf de personnes écoutant des syllabes ou de la musique.
On constate que la zone active est toujours localisée au niveau de la partie supérieure du lobe temporal, mais la zone est plus étendue chez la personne écoutant de la musique.
- **Document 4** : IRMf d'individus écoutant de la musique avec ou sans paroles.
On constate l'activation d'une zone commune aux deux expériences, et l'activation d'une deuxième zone chez l'individu qui écoute la musique avec les paroles.
- **Document 5** : Graphique montrant les variations de volume de la substance grise de certaines zones du cortex cérébral liées à l'audition chez des individus musiciens par rapport à des non musiciens. On constate une augmentation de 5 % et 2 % du volume de substance grise chez les musiciens amateurs et de 6 % et 4 % chez des musiciens professionnels.
- **Document 6** : Explication du concept d'oreille absolue, compétence possédée par certaines personnes permettant de reconnaître rapidement les notes musicales. Discussion sur l'origine innée et acquise de cette compétence.

Réponses attendues aux questions :

- 1. Le texte montre que la surdité peut provenir d'un problème au niveau de l'oreille mais aussi au niveau du cerveau (AVC, trauma crânien).
- 2. La zone activée par l'écoute d'une syllabe ou d'une musique est située dans la partie supérieure du lobe temporal.
- 3. On constate l'activation d'une zone commune à l'écoute de musique avec ou sans paroles, mais aussi l'activation d'une deuxième zone chez l'individu qui écoute la musique avec les paroles. On peut penser que cette deuxième zone est activée par la présence de paroles, qu'est spécialisée dans l'écoute de paroles.



- 4. On constate une augmentation de 5 % et 2 % du volume de substance grise des deux zones du cortex liées à l'audition chez les musiciens amateurs et de 6 % et 4 % chez des musiciens professionnels, par rapport à des individus non musiciens. La pratique musicale régulière a donc augmenté le volume de substance grise des régions liées à l'audition. On parle de plasticité cérébrale.
- 5. Le texte nous apprend que le développement de l'oreille musicale peut être lié à une expérience musicale précoce, donc un facteur lié au mode de vie, mais repose aussi sur des facteurs génétiques innés.
- 6. Le message nerveux issu des oreilles va activer des aires spécialisées dans l'audition situées dans le lobe temporal. Ces aires sont associées à d'autres aires comme celles liées à la reconnaissance de paroles. L'écoute de la musique va activer les aires auditives de manière spécifique, et l'écoute (ou la pratique) intensive de la musique va même parfois modifier l'organisation de ces aires (leur volume par exemple).

2.3. Protocoles et résultats expérimentaux

Matériel :

- Utilisation du logiciel Eduanat2.

Protocole complet et résultats attendus :

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/?p=1266> : Utiliser ÉduAnat2 pour mettre en évidence les aires cérébrales impliquées dans l'audition, Philippe Cosentino, 2019.

Activité 3 : Écouter de la musique, un danger ? (activité de groupe)

3.1. Généralités

Cette troisième activité propose d'étudier par groupe les risques liés à l'écoute de la musique dans deux contextes, un concert et l'écoute au casque, et de proposer des solutions simples pour limiter les troubles auditifs potentiels.

Objectifs notionnels :

- Des sons trop intenses peuvent entraîner des dégâts auditifs ; ils peuvent être irréversibles et causer une surdité ;
- La santé auditive.

Objectifs méthodologiques :

- Relier l'intensité du son au risque encouru par l'oreille interne.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Travailler en groupe ;





- Présenter un travail de groupe à l'oral.

Durée : 1 séance d'une heure, incluant 20 minutes de préparation et 2 fois 5 minutes de présentation orale et 20 minutes de débat et questions sur les habitudes des élèves eux-mêmes et les risques qu'elles peuvent présenter.

3.2. Présentation des documents

3.2.1. Ensemble documentaire Groupe 1

Présentation des documents : Les risques lors d'un concert

- **Document 1** : Photographie de l'installation sonore lors d'un concert. La légende indique un record mesuré lors d'un concert en sortie d'enceinte : 129,5 dB.
- **Document 2** : Témoignage d'un traumatisme sonore lors d'un concert et des symptômes qui l'accompagnent.
- **Document 3** : Graphique présentant l'atténuation du niveau sonore en fonction de la distance.
- **Document 4** : Le document met en évidence l'importante réduction des risques de troubles auditifs en utilisant une protection auditive comme les bouchons d'oreille.

Suggestions de questions :

- Quels sont les risques auditifs lors d'un concert ? Quels sont les symptômes liés à ces risques ?
- Quels sont les moyens de prévention ?

Ressources complémentaires :

- Site de prévention sur les risques auditifs, clairement axé sur les adolescents : <http://www.ecoute-ton-oreille.com/>

3.2.2. Ensemble documentaire Groupe 2

Présentation des documents : Les risques avec des écouteurs

- **Document 5** : Le document présente des données sur les troubles auditifs chez les jeunes, et donne les résultats d'une étude démontrant que la durée d'écoute au casque est un facteur expliquant la dégradation de l'audition. La légende indique aussi que les ¾ des jeunes de 15-17 ans écoutent la musique au casque.
- **Document 6** : Le document présente les spécifications techniques d'un casque audio actuel, et la donnée intéressante est le niveau sonore de 110dB à la sortie des écouteurs.
- **Document 7** : Le document présente un exemple de message d'alerte obligatoire en France sur les appareils de diffusion de musique au casque (lecteurs mp3, tablettes, smartphones), afin de limiter le volume sonore d'écoute.





- **Document 8 :** Le graphique montre les seuils d'exposition sonore recommandés par l'OMS, en mettant en relation la durée d'écoute et le niveau sonore. On constate par exemple qu'une exposition de plus de 30 secondes à un niveau sonore de 110 dB peut être nocive pour l'audition.

Suggestions de questions :

- Quels sont les risques auditifs de l'écoute de musique au casque ?
- Quels sont les moyens de prévention ?

Ressources complémentaires :

- Site de prévention sur les risques auditifs, clairement axé sur les adolescents : <http://www.ecoute-ton-oreille.com/>

3.3. Les indicateurs de réussite

Groupe 1 :

- 1. Le risque auditif lors d'un concert est dû au niveau sonore très important à la sortie des systèmes de sonorisation (enceintes). Le niveau sonore à une distance réduite peut être très largement supérieur au seuil à risque de 85 dB. Dans ce cas, l'exposition à la musique peut causer des troubles auditifs dont les symptômes sont des acouphènes (sifflements, bourdonnements, bruits parasites).
- 2. Pour prévenir le risque auditif lors d'un concert, la première mesure est de s'éloigner des sources sonores, car le niveau sonore diminue très rapidement avec la distance. A 8 m, on a une atténuation sonore de 24 dB par exemple. Ensuite, on peut aussi s'équiper de protections auditives, comme des bouchons d'oreilles, qui réduisent fortement le niveau sonore atteignant le tympan. La réduction peut être supérieure à 20 dB.

Groupe 2 :

- 1. Le risque auditif lié à l'écoute de musique au casque est la combinaison de 2 facteurs : le niveau sonore d'écoute et le temps d'écoute. Un niveau sonore très élevé comme 110 dB pour un casque audio, peut rapidement causer une perte auditive. Mais une écoute très prolongée (plusieurs heures) à un niveau modéré peut aussi poser problème et dégrader l'audition au fil du temps.
- 2. Pour prévenir les risques auditifs, il faut éviter d'écouter la musique à un niveau trop élevé, c'est pour cela que les appareils de diffusion doivent avertir par un message que le niveau sonore est élevé et qu'une écoute prolongée peut être nocive. Il faut aussi réduire globalement le temps d'écoute de musique au casque, en particulier chez les jeunes.





Exercices

4.1. L'atelier des apprentis

Exercice 1 : Niveau sonore et risques auditifs

Compétence principalement travaillée : Relier l'intensité du son au risque encouru par l'oreille interne.

Correction :

1. Le niveau sonore maximal ne présentant aucun risque est 80 dB, et le niveau maximal émis par le casque du baladeur est 100 dB.
2. Le niveau sonore maximal de l'orchestre pendant un concert de musique classique peut atteindre 110 dB.
3. Le niveau sonore maximal du casque est inférieur à celui au cœur du concert, et il est équivalent à celui d'une tronçonneuse.
4. Les musiciens professionnels, ne pouvant pas s'éloigner les uns des autres dans l'orchestre, pourraient porter des protections auditives limitant le niveau sonore, comme des bouchons d'oreille spéciaux pour les musiciens.

Ressource complémentaire :

- Pour aller plus loin sur les risques chez les musiciens d'orchestre, lien vers un podcast très complet sur le sujet (13 minutes) :
<https://www.francemusique.fr/emissions/le-dossier-du-jour/les-risques-auditifs-pour-les-musiciens-d-orchestre-16892>

Exercice 2 : Les sons des mammifères marins

Compétence principalement travaillée : Analyser des données d'un tableau.

Correction :

1. Le champ auditif humain s'étalant de 20 Hz à 20 kHz, on pourrait entendre la baleine dont le chant est émis autour de 4 kHz. Par contre, les clics du dauphin sont émis à une fréquence supérieure à celles perceptibles par les humains.
2. Le niveau sonore d'émission des mammifères marins est très important, largement supérieur à celui des humains. Mais dans l'eau la propagation des sons est différente, plus difficile.

4.2. Le repaire des initiés

Exercice 3 : Distance et niveau sonore

Compétence principalement travaillée : Relier l'intensité du son aux risques auditifs.

Correction :

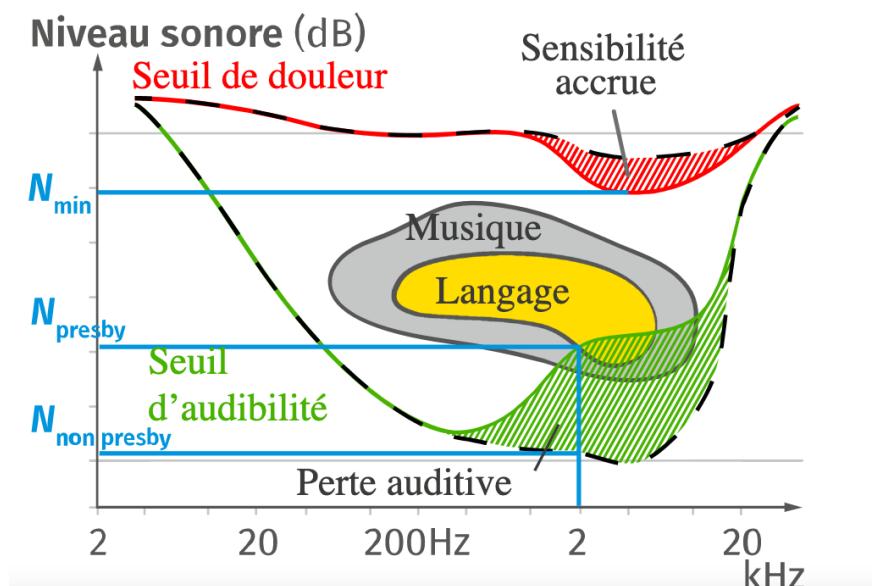
1. D'après l'abaque, à 3 m, il y a une atténuation de 9,5 dB.
 $115 - 9,5 = 105,5$ dB ; donc à 3 m de la scène, le niveau sonore est de 105,5 dB.
D'après l'abaque, à 10 m, il y a une atténuation de 20 dB. $115 - 20 = 95$ dB ; donc à 10 m de la scène, le niveau sonore est de 95 dB.
2. Pour avoir 90 dB maximum au niveau des oreilles, il faut donc une atténuation de 25 dB. D'après le document, pour avoir cette atténuation, il faut reculer d'environ 18 m.
3. Chers spectateurs ! Préservez vos oreilles ! Pour cela, ne restez pas trop près des enceintes et reculez à 20 m. Si vous ne résistez pas à l'envie d'approcher vos musiciens favoris, pensez aux protections auditives !

Exercice 4 : Troubles de l'audition

Compétence principalement travaillée : Relier l'intensité du son aux risques auditifs.

Correction :

1. On fait une lecture graphique du niveau sonore minimum N_{\min} correspondant au nouveau seuil de douleur (en rouge). Cela correspond au minimum de la courbe rouge : $N_{\min} \simeq 100$ dB.





2. Pour évaluer la perte auditive liée à la presbyacousie à 2 kHz, on détermine graphiquement le niveau sonore lié au seuil d'audibilité N_{presby} chez une personne atteinte de presbyacousie et chez une personne non atteinte $N_{\text{non presby}}$ à 2 kHz. On trouve $N_{\text{presby}} \simeq 40 \text{ dB}$ et $N_{\text{non presby}} \simeq 0 \text{ dB}$. La perte auditive est donc $P = N_{\text{presby}} - N_{\text{non presby}} = 40 \text{ dB}$.

3. Ces troubles peuvent être causés soit par une altération des structures de perception (ex. : cils vibratiles), soit par une altération du système nerveux associé au traitement des sons (ex. : nerf auditif).

Exercice 5 : L'audition des mammifères

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données.

Correction :

1. L'éléphant et la taupe n'ont aucune fréquence perçue en commun avec la chauve-souris et le dauphin.

2. Le champ auditif d'un être vivant est défini par les fréquences audibles en fonction du niveau sonore. Donc le deuxième paramètre déterminant le champ auditif est le niveau sonore du son entendu.

Source :

- Un excellent dossier sur l'évolution de l'audition des Vertébrés terrestre avec podcast, inspiré de *Un coup de gueule plein les oreilles* de Stephen Jay Gould.
<https://www.podcastscience.fm/dossiers/2012/01/04/histoire-evolutive-de-laudition-chez-les-vertebres/>

4.3. Le coin des experts

Exercice 6 : Écouter le silence

Compétence principalement travaillée : Interpréter des données d'imagerie cérébrale.

Correction :

Chez les 2 individus testés, on constate une activité cérébrale au niveau du cortex auditif (gauche et droit) lors de l'écoute d'un son, signalée en rouge. Mais on constate aussi une activité localisée au même endroit (en jaune) ou à proximité immédiate (en vert), lorsque les individus « écoutent le silence ». On peut donc affirmer que l'écoute du silence active le cortex auditif, quasiment comme l'écoute d'un son.



Exercice 7 : Sommeil et audition

Compétence principalement travaillée : Interpréter des données d'imagerie cérébrale.

Correction :

Sur l'IRMf du bébé endormi, on constate la présence de deux zones activées, situées au niveau du lobe temporal, plus précisément au niveau du cortex auditif (*voir IRMf témoin en coupe frontale, page 232*). Cette activité cérébrale est donc localisée comme lorsqu'une personne entend, on peut donc effectivement affirmer que le bébé entend lorsqu'il dort.

Exercice 8 : Prévention des risques auditifs

Compétence principalement travaillée : Utiliser ses connaissances.

Correction :

Les risques auditifs sont liés au fait d'écouter la musique à un niveau sonore trop élevé ou à un niveau assez élevé pendant longtemps, c'est pour cela que l'affiche dit « à force d'écouter la musique trop fort », donc pendant longtemps et avec un niveau sonore trop élevé. Dans cette situation, le risque auditif peut aboutir à une perte auditive, voire une surdité partielle ou totale. Le slogan « on finit par l'entendre à moitié » fait donc allusion à un risque de surdité partielle.

Source :

- Site de prévention sur les risques auditifs : <http://www.ecoute-ton-oreille.com/>

5. Déclinaison d'exercices dans un autre niveau de difficulté

BIENTÔT DISPONIBLE.

