Chapitre 1 : L'atmosphère terrestre et la vie

Présentation **2**

Activités **4**

Activité documentaire 1 : Origine de l'atmosphère et des océans terrestres (p. 18-19) 4

Activité de groupe 2 : Vie terrestre et évolution de l'atmosphère (p. 20-21) 7

Groupe 1 : Les formations de fers rubanés 7

Groupe 2 : Stromatolites et production de dioxygène 9

Groupe 3 : Un aperçu du cycle du dioxygène 9

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 10

Activité documentaire 3 : L'ozone dans l'atmosphère terrestre (p. 22) 11

Activité documentaire 4 : Les combustibles fossiles (p. 23) 14

Activité documentaire 5 : Le cycle du carbone (p. 24-25) 16

Bilan (p. 27) **19**

Exercices **20**

Zone d'échauffement (p. 28) 20

L'atelier des apprentis (p. 29) 22

Le repaire des initiés (p. 30) 26

Le coin des experts (p. 31-32) 28

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Le chapitre 1 traite de l'analyse de l'atmosphère terrestre et de son évolution au cours des temps géologiques. Les compositions des atmosphère primitive et actuelle seront ainsi décrites puis expliquées, en lien avec les nombreux processus géologiques et biologiques impliqués.
Ce premier chapitre est aussi l'occasion d'aborder avec les élèves la composition, la structure et le rôle de la couche d'ozone, l'apparition de la vie, la notion de cycle (notamment avec le cycle du carbone) ou encore de travailler à nouveau les combustibles fossiles. Ces éléments seront évoqués de nouveau dans les prochains chapitres.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- L'ADN support de l'information génétique

Ce qui a été enseigné en première :

- La photosynthèse
- Le rayonnement solaire

Liens avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :
Liens avec les chapitre 2, 3 et 4.

Ce chapitre ouvre le thème 1 : Science, climat et société. Les éléments abordés dans ce chapitre : l'atmosphère, les combustibles fossiles, le cycle du carbone sont de nouveau évoqués dans les chapitres 2, 3 et 4 qui s'intéressent à la complexité du système climatique et au climat du futur. La notion de cycle du carbone pourra par exemple être mobilisée tout au long de thème.

Bibliographie :

- C. Robert et R. Bousquet, « La dynamique du système Terre », *Géosciences* (2013).
- M. Renard *et al*., *Eléments de géologie*, 16e édition du Pomerol (2018).
- M. Gargaud, D. Despois et J-P. Parisot, *L'environnement de la Terre primitive* (2005).
- Peter Raven *et al*., *Biologie* (2015).
- J-F. Deconinck, *Paléoclimats, l'enregistrement des variations climatiques*, Vuibert (2006).
- R. Delmas, S. Chauzy, J-M. Verstraete, H. Ferré, *Atmosphère, océan et climat*, Belin (2007).
- A. Foucault, *Climatologie et paléoclimatologie*, Dunod (2016).
- M. Rotaru, *Les climats passés de la Terre*, Vuibert (2006).
- J.C. Duplessy et G. Ramstein, *Paléoclimatologie, enquête sur les climats anciens*, EDP Sciences (2013).
- Dossiers de *Pour la science* sur « L'atmosphère » : https://www.pourlascience.fr/sd/ecologie/dossier-pour-la-science-n012-410.php
- Dossiers de *Pour la science* sur « La vie sur Terre, des naissances multiples ? » : https://www.pourlascience.fr/util/chutier/pour-la-science-365-335.php

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sitographie :

- Un dossier thématique du site Planet Terre de l'ENS de Lyon sur le cycle biogéochimique du carbone : https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressources/dossiers-thematiques/td-cycle-du-carbone
  et sur les stromatolites (généralités) : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/stromatolithes.xml ;
- Un article de *Trust my Science* sur la Terre primitive : https://trustmyscience.com/terre-primitive-etait-immense-ocean-sans-continents/ ;
- Un article du site Sciencetips sur l'origine de la vie sur Terre : https://newsletters.artips.fr/Sciencetips/Miller_Soupe/?uiad=063ecd6b66.
- Un article de *Pour la science* sur le Sahara vert, pour étudier un cas de variation climatique passée : https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/comment-le-sahara-vert-a-disparu-12749.php
- Un article de *Pour la science* sur les variations climatiques récentes : https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/le-climat-des-21-000-dernieres-annees-5466.php
- Un article de *Pour la science* sur les variations climatiques depuis 800 000 ans : https://www.pourlascience.fr/sd/environnement/800-000-ans-dhistoire-du-climat-2801.php
- Une belle infographie du CNRS sur l'apparition de la vie : https://lejournal.cnrs.fr/infographies/les-origines-de-la-vie
- Quelques compléments d'informations sur les climats passés : https://www.reseau-canope.fr/tdc/tous-les-numeros/la-meteorologie/sequences-pedagogiques/climats-du-passe-du-present-et-du-futur.html

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activités

Dans un premier temps, la formation de l'atmosphère et de l'hydrosphère sont abordées, puis l'évolution de cette atmosphère en lien avec le développement de la vie. Ensuite, on s'intéresse à la couche d'ozone, sa formation et son rôle dans le maintien de la vie sur Terre. Enfin, l'impact des combustibles fossiles est traité avant d'étudier dans une plus large mesure le cycle du carbone.

Activité documentaire 1 : Origine de l'atmosphère et des océans terrestres (p. 18-19)

Le but de cette activité est d'une part de comparer les compositions de l'atmosphère terrestre primitive et actuelle et d'autre part d'expliquer comment les océans se sont formés.

Lien avec le programme : Cette activité comprend des items du début de la partie 1.1 du programme, relatifs à l'évolution de l'atmosphère terrestre.

Objectifs notionnels :

- Il y a environ 4,6 milliards d'années, l'atmosphère primitive était composée de N_2, CO_2 et H_2O. Sa composition actuelle est d'environ 78 % de N_2 et 21 % de O_2, avec des traces d'autres gaz (dont H_2O, CO_2, CH_4 et N_2O).
- Le refroidissement de la surface de la Terre primitive a conduit à la liquéfaction de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère initiale. L'hydrosphère s'est formée, et en ainsi s'est développée la vie.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser des données, en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques.
- Déterminer l'état physique de l'eau pour une température et une pression donnée à partir de son diagramme d'état.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques
Ce graphique permet de comparer les compositions actuelle et primitive de l'atmosphère de la Terre. La représentation en histogramme s'intéresse à 4 constituants majeurs : la proportion en eau, en diazote, en dioxygène et en dioxyde de carbone.

Document 2 : Le dégazage de la Terre primitive
Ce document présente la composition chimique relevée dans les gaz volcaniques. Il sera à associer avec le document 3.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Le bombardement météoritique de la Terre primitive
Ce document permet d'étudier la composition chimique relevée lors du chauffage d'une météorite. L'importance du champ magnétique terrestre dans le maintien de l'atmosphère est aussi présentée.

Document 4 : État physique de l'eau et conditions atmosphériques
Dans le diagramme de phases sont indiqués les trois états de l'eau. Le tableau de comparaison pour la Terre et Vénus permet d'étudier deux paramètres : la pression moyenne et la température.

Réponses attendues aux questions :

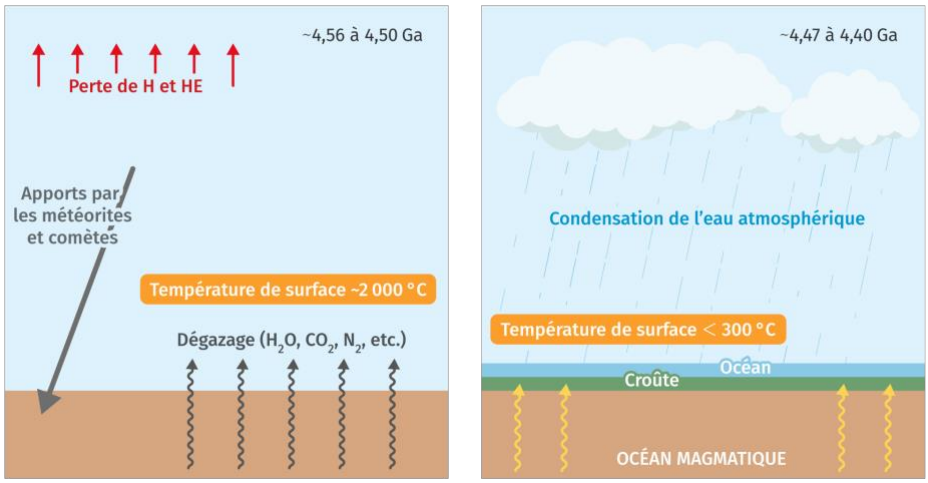
1. L'atmosphère actuelle contient peu d'eau avec 78 % de diazote, 21 % de dioxygène et du dioxyde de carbone sous forme de traces. Il y a donc un changement de composition entre l'atmosphère primitive et l'atmosphère actuelle : enrichissement en dioxygène et en diazote, diminution en dioxyde de carbone et vapeur d'eau.

2. En analysant le document 2 et le document 3, on s'aperçoit que les compositions des gaz émis par les volcans et lors du chauffage de la météorite sont très proches de la composition primitive de la Terre. On peut donc supposer que l'atmosphère primitive a une origine mixte : liée à l'apport météoritique et au dégazage du manteau terrestre.

3. En considérant que les paramètres de Vénus sont similaires à ceux de la Terre primitive, on remarque qu'à la pression et la température données, l'eau est sous forme de vapeur. Sur la Terre actuelle, à la pression et la température données, l'eau est sous forme liquide.

4. La composition des gaz émis par le volcanisme et l'apport des comètes montrent que l'hydrosphère terrestre a une double origine, car l'eau (H_2O) se retrouve à la fois dans les gaz des volcans et lors du chauffage d'une chondrite.
On parle de double origine car l'une est interne à la Terre et l'autre est extraterrestre.

5. Schéma bilan :



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Ressources complémentaires :

- « La Terre primitive n'était probablement qu'un immense océan sans continents », *Trust my Science* : https://trustmyscience.com/terre-primitive-etait-immense-ocean-sans-continents/.
- Un article de *Pour la science* sur la Terre primitive : https://www.pourlascience.fr/sr/article/la-terre-avant-la-vie-3407.php

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité de groupe 2 : Vie terrestre et évolution de l'atmosphère (p. 20-21)

Le but de cette activité est d'expliquer l'évolution de la composition de l'atmosphère, et notamment d'éclairer le lien entre augmentation de dioxygène dans l'atmosphère et apparition de la vie. À partir de traces fossiles, les premières formes de vie terrestre peuvent ainsi être étudiées.

Lien avec le programme : Cette activité comprend les items de la partie 1.1 du programme relatifs à l'oxygénation de l'atmosphère et à l'apparition de la vie sur Terre.

Objectifs notionnels :

- Les premières traces de vie sont datées d'il y a au moins 3,5 milliards d'années. Par leur métabolisme photosynthétique, des cyanobactéries ont produit le dioxygène qui a oxydé, dans l'océan, des espèces chimiques réduites.
- Le dioxygène s'est accumulé à partir de 2,4 milliards d'années dans l'atmosphère. Sa concentration atmosphérique actuelle a été atteinte il y a 500 millions d'années environ.
- Les sources et puits de dioxygène atmosphérique sont aujourd'hui essentiellement lies aux êtres vivants (photosynthèse et respiration) et aux combustions.

Objectifs méthodologiques :

- Mettre en relation la production de dioxygène dans l'atmosphère avec des indices géologiques (oxydes de fer rubanés, stromatolites, etc.).
- Ajuster les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène.

Durée estimée : 55 minutes.

Présentation des documents

Document 1 commun à tous les groupes : Évolution de la pression partielle de différents gaz au cours du temps
Ce graphique représente l'évolution de la proportion de différents gaz présents dans l'atmosphère au cours du temps. Les élèves pourront remarquer que la teneur en dioxygène augmente à partir de 2,4 Ga. Les autres éléments ont été vus dans l'activité 1.

Groupe 1 : Les formations de fers rubanés

Présentation des documents

Document 2 : Formation de fers rubanés
Les fers rubanés (BIF pour *Banded Iron Formations*) sont exploités en gisements pour leur richesse en fer. Ce document sert de document naturaliste pour expliquer les traces laissées

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

par le dioxygène. Il peut éventuellement être complété avec un échantillon disponible au laboratoire de SVT.

Document 3 : Oxydation du fer
Ce document indique les équations d'oxydation du fer. Il peut être utilisé pour un travail en interdisciplinarité. Il pourra, si les conditions matérielles le permettent, être complété par le TP suivant.

Protocoles et résultats expérimentaux

Oxydation de l'élément fer

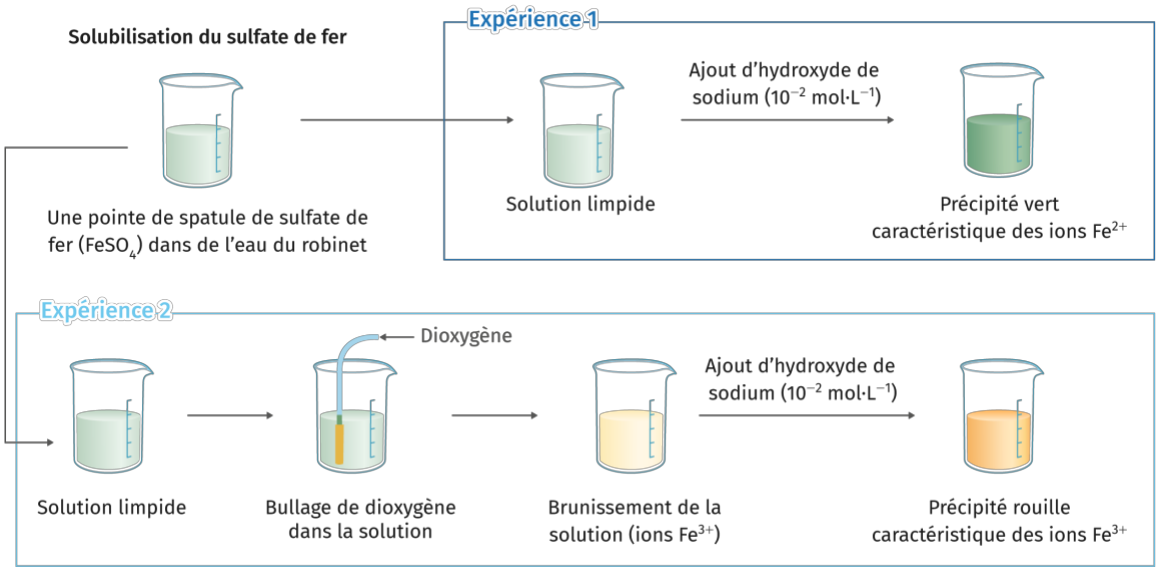
Cette manipulation permet de montrer que la production de dioxygène a entraîné l'oxydation du fer et conduit à la formation de dépôt de fer rubané.

Matériel nécessaire :
- béchers,
- sulfate de fer ($FeSO_4$) solide ou solution de sulfate de fer (II) (Fe^{2+}(aq) ; SO_4^{2-}(aq)) ;
- solution d'hydroxyde de sodium (Na^+(aq) ; HO^-(aq)) à 0,1 mol·L^{-1},
- bulleur à dioxygène,
- spatule.

Protocole :
- Mélanger dans un bécher une pointe de spatule de sulfate de fer avec de l'eau du robinet, ou verser un peu de solution de sulfate de fer (II) dans un bécher.
- Agiter à l'aide d'une spatule.
- Ajouter quelques gouttes d'une solution d'hydroxyde de sodium.
- Un précipité vert caractéristique des ions fer (II) Fe^{2+} apparaît.
- Dans un deuxième bécher, mélanger une pointe de spatule de sulfate de fer (II) avec de l'eau du robinet.
- Placer un bulleur dans la solution pour incorporer du dioxygène. La solution vire au brun (apparitions des ions fer (III) Fe^{3+}).
- Ajouter de l'hydroxyde de sodium. Un précipité rouille apparaît, il est caractéristique des ions fer (III) Fe^{3+}.

Résultats attendus :
L'ajout du dioxygène via le bulleur entraîne un changement de couleur. La solution vire au brun (apparitions des ions fer (III) Fe^{3+}).
L'ajout de l'hydroxyde de sodium fait apparaître un précipité rouille, il est caractéristique des ions fer (III) Fe^{3+}.
On peut donc conclure que lorsque l'atmosphère s'enrichit en O_2 (devient oxydante), l'oxygène dissous oxyde le fer qui précipite alors sous forme $Fe(OH)_3$; l'apport d'ions OH^- tire l'équilibre dans le sens de la précipitation.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA



Ressources complémentaires :

- Un article de Pierre Thomas sur les fers rubanés : https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img364-2011-10-10.xml.

Groupe 2 : Stromatolites et production de dioxygène

Présentation des documents

Document 4 : Les stromatolites : des structures mixtes
La photographie illustre des stromatolites d'Australie. Le texte associé détaille la structure si particulière des stromatolites. Ce document est à mettre en lien avec le document 5.

Document 5 : Organisation des stromatolites
Ce document fait le lien entre forme fossile et forme actuelle des stromatolites. Il schématise aussi la structure d'une couche de stromatolite.

Ressources complémentaires :

- Généralités sur les stromatolites : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/stromatolithes.xml.

Groupe 3 : Un aperçu du cycle du dioxygène

Présentation des documents

Document 6 : Respiration et photosynthèse participent aux transferts de dioxygène
Ce document permet de mettre en évidence le cycle du dioxygène. Il est fondé sur des éléments du métabolisme déjà connus des élèves : la photosynthèse et la respiration.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. L'augmentation de la teneur en dioxygène dans les océans a oxydé le fer. Cela a conduit à la formation d'oxydes de fer qui ont précipité. Il en résulte une formation particulière : les formations de fer rubané ou BIF. On peut dater ces formations entre -3,8 et -2 Ga. On suppose donc que le dioxygène est apparu dans l'océan à cette période, car il est inhérent à la mise en place de ces structures.

Groupe 2 :

1. Les stromatolites réalisent la photosynthèse et libèrent ainsi du dioxygène. En datant les plus vieux fossiles à 3,5 Ga, ce qui en fait les plus anciennes formes de vie terrestres, on peut donc conclure qu'à partir de cette date, il y a eu production de dioxygène dans les océans. Cette production est donc corrélée à l'apparition de la vie.

Groupe 3 :

1. On détermine un puit comme un élément qui consomme du dioxygène, c'est le cas de la respiration et de la combustion. Les éléments sources, produisant du dioxygène, sont les éléments réalisant la photosynthèse, comme par exemple les organismes chlorophylliens

Ressources complémentaires :

- Un article de *Pour la science* sur l'apparition de la vie : https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/des-traces-de-vie-de-37-milliards-danneesnbsp-12414.php

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 3 : L'ozone dans l'atmosphère terrestre (p. 22)

Le but de cette activité est de présenter la formation de l'ozone dans l'atmosphère terrestre, la position de la couche d'ozone et son effet bénéfique sur le développement de la vie.

Lien avec le programme : Cette activité comprend quelques items de la partie 1.1 du programme traitant de la couche d'ozone, de sa formation et de sa fonction.

Objectifs notionnels :

- Sous l'effet du rayonnement ultraviolet solaire, le dioxygène stratosphérique peut se dissocier, initiant une transformation chimique qui aboutit à la formation d'ozone.
- Celui-ci constitue une couche permanente de concentration maximale située à une altitude d'environ 30 km.
- La couche d'ozone absorbe une partie du rayonnement ultraviolet solaire et protège les êtres vivants de ses effets mutagènes.

Objectifs méthodologiques :

- Interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet.

Durée estimée : 35 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Synthèse de l'ozone stratosphérique
Ce schéma présente les différentes étapes de la formation de l'ozone stratosphérique.

Document 2 : La couche d'ozone sur Terre
Ce graphique représente la pression en ozone en fonction de l'altitude et permet ainsi de localiser la couche d'ozone.

Document 3 : Absorption de l'ADN et de l'ozone
Ce document représente le spectre d'absorption de l'ADN en fonction de la longueur d'onde. On observe également les radiations atteignant la surface de la Terre et celles atteignant la haute atmosphère. C'est un document qui peut se révéler difficile à analyser, il peut ainsi être bénéfique d'aider ou de guider les élèves avec les questions suivantes.

Aide à l'analyse :
La courbe violette en trait plein correspond aux radiations qui atteignent le sommet de l'atmosphère.

- ➢ Comment l'irradiance spectrale (= puissance énergétique) évolue-t-elle en fonction des différentes longueurs d'ondes ?

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

La courbe violette en trait pointillés correspond au radiations atteignant la surface de la Terre.

- ➢ Indiquer quelle est la puissance énergétique pour des longueurs d'ondes de 280 nm (uvB).
- ➢ Indiquer quelle est la puissance énergétique pour des longueurs d'ondes de 300 nm (uvA).

La courbe bleue correspond au spectre d'absorption de l'ADN.

- ➢ Quelles sont les longueurs d'ondes les plus absorbées par l'ADN ?

L'aire colorée en jaune correspond aux radiations absorbées par l'ozone.

- ➢ Les UV sont-ils absorbés par l'ozone ?

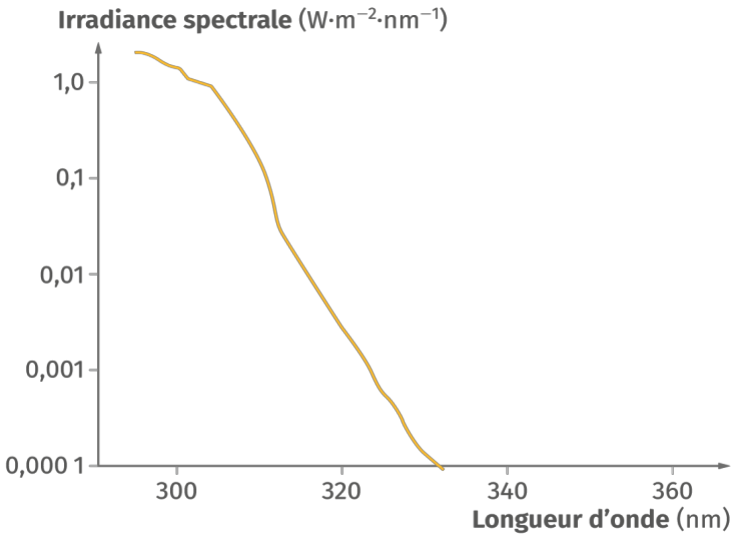
Document 4 : Effets du rayonnement UV sur l'ADN

Ce document représente les effets des UV sur l'ADN. Lorsque des rayons UV atteignent la molécule d'ADN, ils créent une déstabilisation de la molécule entraînant l'apparition d'un dimère de thymine. Cela entraîne une erreur de complémentarité et donc l'apparition d'une mutation.

Réponses attendues aux questions :

1. La couche d'ozone est située entre 20 et 40 km d'altitude car c'est là que la pression en ozone est la plus importante. La couche d'ozone se forme par la dissociation de dioxygène en un atome d'oxygène et l'association avec une molécule libre de dioxygène. Cela se fait sous l'action des rayons UV du soleil.

2. Le spectre d'absorption de l'ozone peut être représenté avec l'allure suivante :



Une comparaison avec le spectre d'absorption de l'ADN montre que les deux molécules absorbent sensiblement les mêmes rayonnements. Les rayons UV non absorbés par l'ozone en altitude peuvent donc être absorbés par l'ADN à la surface de la Terre.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

3. La couche d'ozone terrestre permet de filtrer les UV qui parviennent à la surface de la Terre. Les UV non absorbés par l'ozone sont absorbés par l'ADN en provoquant des effets mutagènes, la couche d'ozone limite donc les mutations qui peuvent survenir chez les organismes vivants terrestres.

Ressources complémentaires :

- « Effets des UV sur l'ADN : lésions et mutations » (par Emilie Warrick - ESPCI Paris) : https://biologiedelapeau.fr/spip.php?article70
- Un article de *Pour la science* sur la couche d'ozone, pour étudier un autre cas intéressant : https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/une-nouvelle-menace-sur-la-couche-dozone-12630.php

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 4 : Les combustibles fossiles (p. 23)

Cette activité présente le mode de formation des combustibles fossiles. Elle permet de faire émerger les notions de renouvelabilité en s'appuyant notamment sur des notions vues précédemment, notamment en cycle 4.

Lien avec le programme : Les items de la fin de la partie 1.1 concernant les combustibles sont traités dans cette activité.

Objectifs notionnels :

- Les combustibles fossiles se sont formés à partir du carbone des êtres vivants, il y a plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions d'années.
- Ils ne se renouvellent pas suffisamment vite pour que les stocks se reconstituent : ces ressources en énergie sont dites non renouvelables.

Durée estimée : 25 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Formation d'une couche de charbon
Ce schéma représente le mécanisme de formation au cours du temps de couches de charbon, et notamment l'alternance visible dans le paysage à l'affleurement.
On peut attirer l'attention des élèves sur la nécessité de l'inondation du sol, qui préserve une partie de la matière organique de la décomposition.

Document 2 : Minerai de lignite : un combustible fossile
Cette photographie illustre un combustible fossile : la lignite. Si des échantillons sont disponibles au laboratoire de SVT, il peut être pertinent de les montrer aux élèves. La variation de la teneur en carbone peut aussi être abordée, en lien avec le diagramme de Van Krevelen (présent dans les exercices).

Document 3 : Carbonifère et CO_2 atmosphérique
Ce graphique représente la variation de la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique au cours des temps géologiques. Ce document combine plusieurs sources, notamment des extrapolations faites à partir du nombre de stomates retrouvés sur des feuilles fossilisées.

Réponses attendues aux questions :

1. Le charbon se forme par la transformation de la matière organique fossile. Celle-ci est accumulée dans un bassin inondé. En partie préservée de la décomposition, recouverte de sédiments puis enfoncée (subsidence), elle est progressivement transformée sous l'effet de l'augmentation de pression et de température. On parle de combustible fossile car cette matière peut « brûler » et qu'elle est issue d'une lente transformation (traces de végétaux retrouvés).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Au Carbonifère, une végétation très dense recouvre les terres émergées. Il y a ensuite enfouissement d'une grande quantité de matière organique, issue de ces forêts, qui participe à la formation de combustibles fossiles. La forte consommation en dioxyde de carbone par les plantes, due à la photosynthèse, a entraîné une baisse de sa teneur. Cela a eu un impact important sur le climat : diminution de l'effet de serre, et donc refroidissement (des connaissances vues dans les prochains chapitres sont nécessaires pour conclure sur ce dernier point).

3. Le carbone utilisé lors de la combustion du charbon provient de la transformation du carbone organique des végétaux qui se sont développés il y a des dizaines, voire des centaines de millions d'années.

4. Les stocks de combustibles fossiles sont dits « non renouvelables », car leur temps de formation est extrêmement lent (plusieurs dizaines, voire centaines de millions d'années) et qu'ils ne se régénèrent ainsi pas à l'échelle d'une vie humaine.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 5 : Le cycle du carbone (p. 24-25)

Cette activité présente le cycle du carbone et permet de voir les notions de flux et de réservoirs, mais également de comprendre que les réservoirs peuvent être subdivisés en plus petit réservoirs. Par ailleurs, l'action anthropique est mise en avant par son action sur le cycle du carbone.

Lien avec le programme : La dernière activité du chapitre correspond aux phrases de la partie 1.1 du programme relatives au cycle biogéochimique du carbone.

Objectifs notionnels :

- Le carbone est stocké dans plusieurs réservoirs superficiels : l'atmosphère, les sols, les océans, la biosphère et les roches.
- Les échanges de carbone entre ces réservoirs sont quantifiés par des flux (tonne/an).
- Les quantités de carbone dans les différents réservoirs sont constantes lorsque les flux sont équilibrés. L'ensemble de ces échanges constitue le cycle du carbone sur Terre.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser un schéma représentant le cycle biogéochimique du carbone pour comparer les stocks des différents réservoirs et identifier les flux principaux de carbone d'origine anthropique ou non.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Des flux et des réservoirs de carbone
Ce schéma représente les flux entre différents réservoirs constituant le cycle du carbone. Cette représentation sous forme de coupe permet aux élèves de mieux se représenter les flux et réservoirs que dans le schéma fonctionnel du document 4. Cependant, ce document 1 est moins complet et peut être plus difficile à lire. La question 1 oriente l'analyse pour montrer que le carbone est présent sous de très nombreuses formes.
Pour favoriser une compréhension complète du cycle du carbone, il convient d'allier l'analyse des documents 1 et 4.

Document 2 : L'océan : un exemple de réservoir de carbone
Ce document représente à l'échelle de l'océan les différents réservoirs de carbone et permet de comprendre que même au sein d'un réservoir, des interactions parfois complexes coexistent. On découpe l'océan en deux zones : une zone de surface et une zone profonde. Précision du texte : 99 % du carbone qui atteint le fond n'est pas utilisé par les bactéries. La majeure partie est dissoute ou revient vers la surface.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Un exemple de flux de carbone
Ce document présente les équations-bilan de la formation des carbonates et permettent d'appréhender un exemple de flux de carbone par un ensemble de réactions chimiques.

Document 4 : Représentation du cycle actuel du carbone
Ce schéma représente les flux de carbone entre les différents réservoirs. Il indique également les impacts anthropiques. Cette représentation synthétique du cycle du carbone est reprise dans le bilan du chapitre car c'est celle qui est à retenir.

Réponses attendues aux questions :

1. Le carbone dans ce schéma est représenté par :
- la matière organique enfouie ;
- le phytoplancton ;
- le CO_2 atmosphérique ;
- une partie des sédiments ;
- les déchets organiques ;
- les forêts et la biomasse continentale (agrosystèmes) ;
- les sources énergies issues de la biomasse continentale : bois, biocarburants, biogaz ;
- les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz).

2. Un réservoir désigne un espace pouvant être délimité, dans lequel du carbone est stocké sous différentes formes. L'océan (profond et de surface) est, par exemple, un réservoir de carbone. Les sédiments (plus généralement les roches), l'atmosphère et la biosphère constituent aussi des réservoirs de carbone.

3. Dans le cas du réservoir de l'océan, celui-ci est subdivisé en deux parties : l'océan de surface et l'océan profond. Les quantités de carbone stockées ne sont pas les mêmes (700 Gt pour la surface contre 38 000 Gt pour l'océan profond).

4. Un flux désigne le transfert d'un élément d'un réservoir à un autre. La respiration ou la photosynthèse sont des flux biologiques. La combustion ou la précipitation constituent un flux chimique. L'enfouissement, la dissolution, la précipitation et la sédimentation sont, quant à eux, des flux physiques.

5. La déforestation et l'utilisation de combustibles fossiles, ainsi que la production de ciment, sont des activités anthropiques. La déforestation libère plus de 2 Gt dans l'atmosphère, et les combustibles fossiles 6 Gt, pour un total de 8 Gt. Par ailleurs, il y a un équilibre entre dissolution (92 Gt) et le dégazage ajouté à la déforestation (ce qui fait 90 + 2 = 92 Gt). On a aussi un équilibre entre photosynthèse et respiration (100 Gt). En revanche, l'utilisation des combustibles largue 6 Gt qui ne sont pas absorbés. Ces 6 Gt sont en excès dans l'atmosphère. Ils participent alors à l'effet de serre.
On peut ainsi mettre en évidence un enrichissement de la quantité de carbone stockée dans l'atmosphère d'origine anthropique, qui contribue à déstabiliser le cycle du carbone, autrement équilibré.

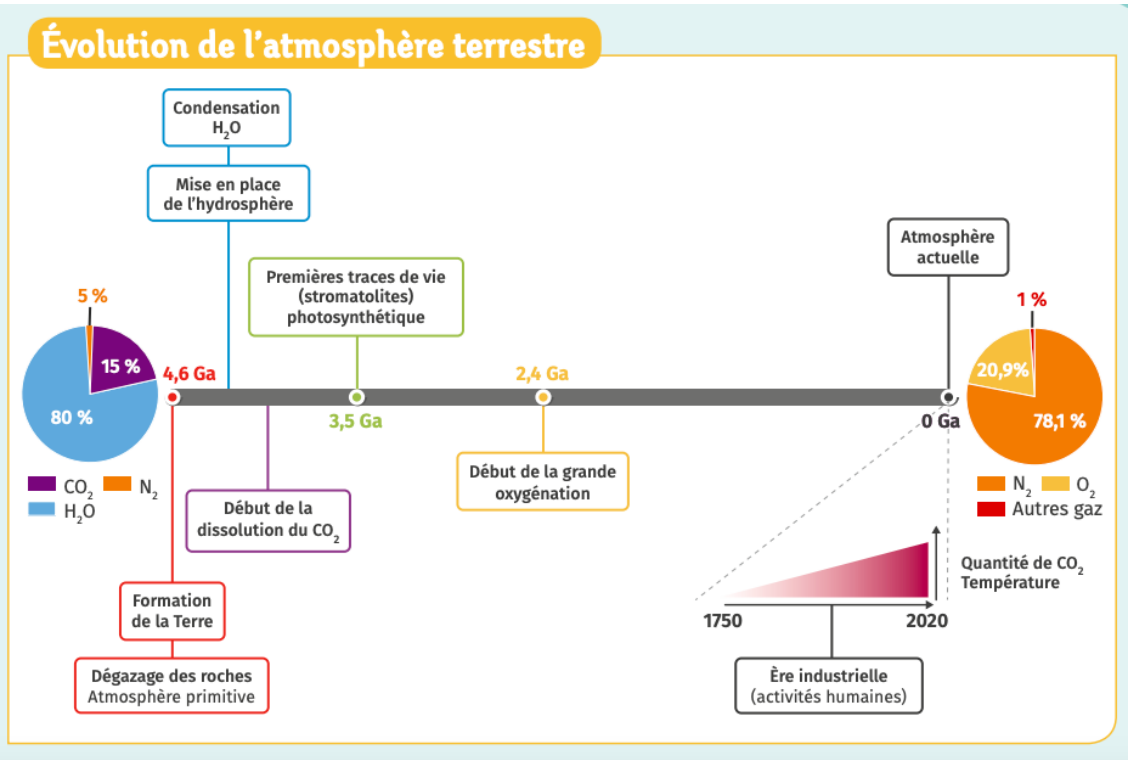
Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

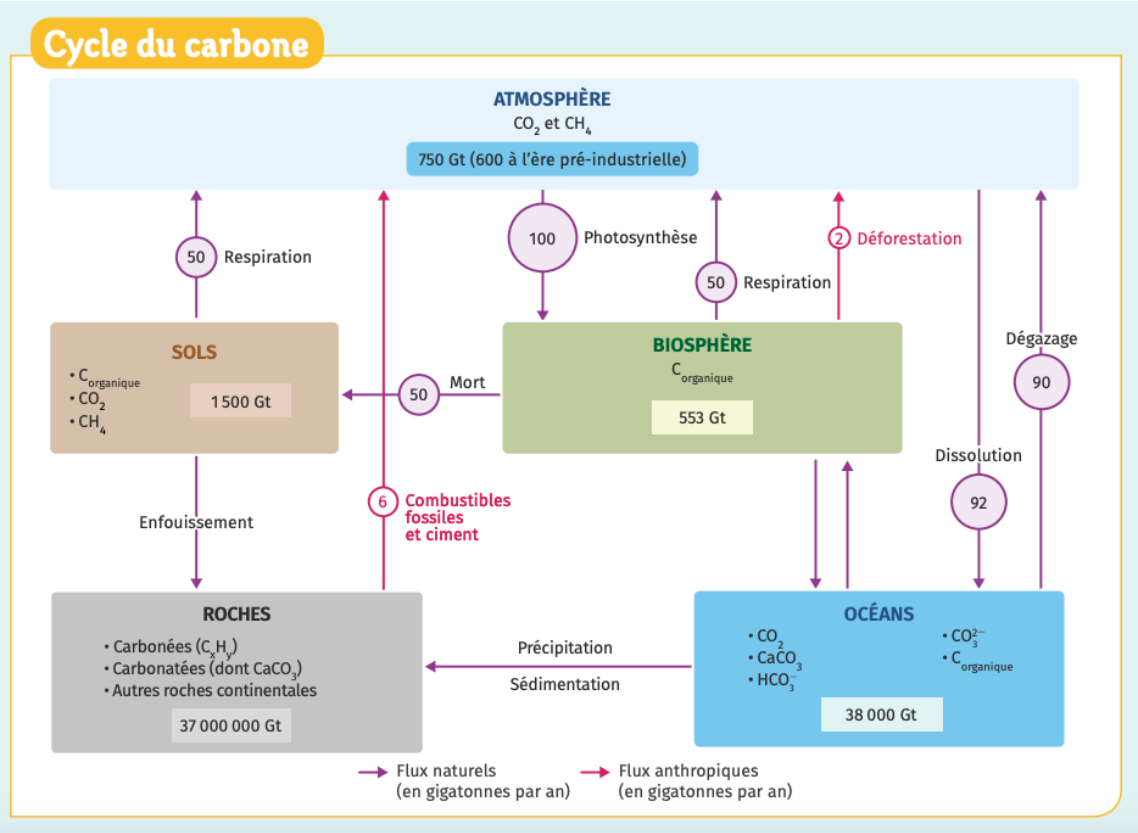
Ressources complémentaires :

- Quelques compléments sur le cycle du carbone : http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 27)





Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 28)

1. Sur Terre, l'atmosphère actuelle est composée de :

b. 78 % de diazote et 21 % de dioxygène.

2. La vie s'est d'abord développée sur Terre dans :

a. les océans.

3. Les premières traces de vie sont datées de :

b. 3,5 milliards d'années.

4. Le dioxygène s'est accumulé dans l'atmosphère à partir de :

b. 2,4 milliards d'années.

5. L'ozone est formé sous l'action des UV à partir :

c. d'un atome d'oxygène et d'une molécule de dioxygène.

6. La couche d'ozone stratosphérique est située entre :

c. 20 et 40 km d'altitude.

7. La formation de combustibles fossiles se fait :

b. en quelques dizaines à centaines de millions d'années.

8. Les combustibles fossiles sont :

c. une source d'énergie non renouvelable.

9. Dans l'océan, le CO_2 atmosphérique peut :

b. être intégré dans le processus de photosynthèse du phytoplancton.

10. Parmi ces flux du cycle du carbone, lequel est d'origine anthropique ?

c. La déforestation.

11. Justifier cette phrase de la paléoclimatologue Valérie Masson-Delmotte : « Beaucoup de décideurs politiques n'ont pas intégré l'inertie du cycle du carbone et du système climatique et donc l'irréversibilité des changements induits par les rejets de gaz à effet de serre, ainsi que la nécessité d'agir très vite pour stabiliser la trajectoire d'évolution du climat. »

Valérie Masson-Delmotte dénonce l'impact important des changements anthropiques sur le cycle du carbone. En raison de l'inertie de ce cycle, les modifications causées par l'homme ont un effet durable sur le système climatique.
Une molécule de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère y restera plusieurs centaines d'années.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Même en arrêtant totalement l'émission du dioxyde de carbone d'origine humaine, la concentration en dioxyde de carbone ne diminuerait pas avant plusieurs centaine d'années. Ainsi, même en diminuant les rejets de dioxyde de carbone, une baisse de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère ne sera pas observable immédiatement.

Document sous licence libre Creative Commons

L'atelier des apprentis (p. 29)

12. Comparaison des atmosphères des planètes telluriques

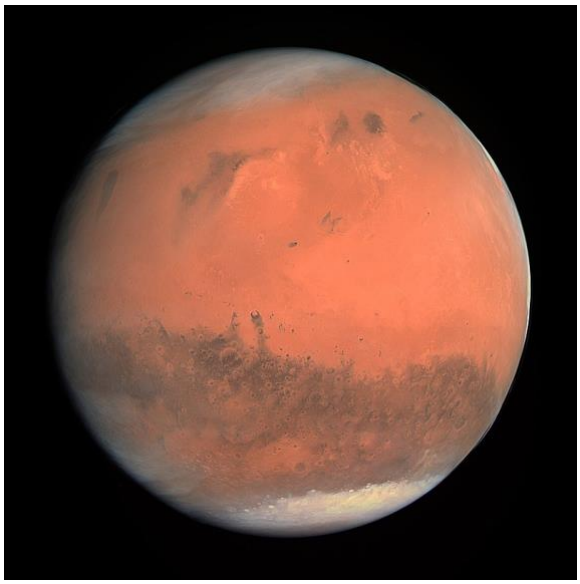
Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère.

Correction :

1. Sur Vénus, on observe une forte teneur de dioxyde de carbone (96 %), à la différence de la Terre, où sa proportion atteint seulement les 400 ppm (0,04 %). L'atmosphère de la Terre contient par ailleurs nettement plus de diazote que l'atmosphère de Vénus (78 % contre 3,5 %).

2. Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre présent en forte quantité dans l'atmosphère de Vénus. La puissance radiative issue du Soleil est supérieure à celle de la Terre, car Vénus est plus proche du Soleil. Bien que Vénus ne soit que la deuxième planète du système solaire, et située à 108 millions de kilomètres du Soleil, la grande teneur de dioxyde de carbone dans son atmosphère entraîne un important effet de serre sur la planète. Cet effet de serre est plus important que sur Terre.

Ressource supplémentaire :



La pression et la composition exactes de l'atmosphère de Mars sont connues depuis moins d'un demi-siècle et remontent aux premières analyses *in situ* effectuées en 1976 par les « atterrisseurs » des sondes Viking 1 et Viking 2. [...]
On sait aujourd'hui que Mars possède une atmosphère ténue dont la pression moyenne au niveau de référence martien est par définition de 610 Pa, avec une température moyenne de −63 °C. Elle est composée principalement de dioxyde de carbone CO_2 (96,0 %), d'argon Ar (1,93 %) et de diazote N_2 (1,89 %). Compte tenu de la faible gravité à la surface de Mars, la hauteur d'échelle de cette atmosphère est de 11 km, plus d'une fois et demie celle de l'atmosphère terrestre, qui n'est que de 7 km.

D'après « Mars », Wikipedia.org.

Suggestion de question supplémentaire :

3. **Émettre des hypothèses pour expliquer la faible épaisseur de l'atmosphère sur Mars.**
On peut supposer que l'atmosphère de Mars est très faible du fait de sa taille et de sa masse qui ne permet pas de retenir l'atmosphère, en raison de sa force de gravitation faible. On peut également émettre l'hypothèse que les vents solaires ont pu souffler l'atmosphère, du fait d'une absence de champ magnétique protecteur, comme sur Terre.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sources/Bibliographie :

- Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te)

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

Ressource supplémentaire :

Nuages de l'atmosphère de Vénus révélés par ultraviolet.

L'atmosphère de Vénus est plus dense et plus chaude que celle de la Terre. La température et la pression à la surface sont respectivement de 740 K (soit environ 470 °C) et 93 bar. Des nuages opaques faits d'acide sulfurique se trouvent dans l'atmosphère, rendant l'observation optique de la surface impossible. Les principaux gaz atmosphériques de Vénus sont le dioxyde de carbone et l'azote. Les autres composants sont présents seulement sous forme de traces.

D'après « Vénus », Wikipedia.org.

1. Comparer les atmosphères de Vénus et de la Terre.
Sur Vénus, on observe une forte teneur de dioxyde de carbone (96 %), à la différence de la Terre, où sa proportion atteint seulement les 400 ppm (0,04 %). L'atmosphère de la Terre contient par ailleurs nettement plus de diazote que l'atmosphère de Vénus (78 % contre 3,5 %)

2. Calculer la masse de chaque gaz (CO_2 et N_2) sachant que la masse de l'atmosphère de Vénus est évaluée à $4,8 \times 10^{20}$ kg.
La proportion de CO_2 est évaluée à 96,5 % soit :
$$m(\mathrm{CO_2}) = 4,8 \times 10^{20} \times 0,965 = 4,6 \times 10^{20}\ \mathrm{kg}$$
La masse de N_2 représente 3,5 % soit :
$$m(\mathrm{N_2}) = 4,8 \times 10^{20} \times 0,035 = 1,7 \times 10^{19}\ \mathrm{kg}$$

3. Indiquer les éléments que les scientifiques doivent prendre en compte pour l'observation de la surface de Vénus et l'envoi de sondes.
L'atmosphère de Vénus est très dense, la surface de la planète n'est pas visible directement. Les sondes envoyées sur la planète doivent résister à des très fortes températures et à l'acide sulfurique.

4. Vénus est la planète la plus chaude du Système solaire. Expliquer pourquoi.
En plus de sa proximité au Soleil, Vénus a une très forte teneur en CO_2, qui contribue à un fort effet de serre.

Document sous licence libre Creative Commons

13. Croissance de stromatolites

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

Correction :

1. La croissance des stromatolites se fait dans un milieu marin. Des organismes de type cyanobactéries se multiplient et emprisonnent des particules carbonatées.

2. L'échelle de la photo est de 5 cm. La distance entre les deux croix blanches est donc de 23,75 cm. La croissance des stromatolites est de 0,4 mm/an. Ainsi il faut plus de 60 ans pour obtenir ce dépôt.

$$\frac{237,5}{0,4} = 59 \text{ ans}$$

Suggestion de question supplémentaire :

3. **Proposer une hypothèse expliquant l'alternance de bandes plus claires et de bandes plus foncées ?**
Les alternances de couleurs sont dues à la teneur en matière organique emprisonnée dans les couches de dépôts. Les zones plus foncées correspondent à des concentrations en matière organique plus importante, les bandes plus claires à des dépôts plus détritiques.
Certains scientifiques supposent que les bandes claires se formeraient le jour, et les bandes sombres, la nuit.

Ressources pour aller plus loin :

- Vidéo : à la découverte des stromatolites en Argentine : https://www.youtube.com/watch?v=_RS2y34JTAo&feature=youtu.be

14. Évolution de la matière organique fossile

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

Correction :

1. Sur le document, on note qu'il y a 3 origines possibles pour la formation de matière organique fossile :
   - origine marine ;
   - origine lacustre ;
   - origine terrestre.

Indépendamment de ces trois origines possibles, les rapports O/C et H/C diminuent toujours pour former des combustibles fossiles. Une baisse de ces rapports traduit surtout une diminution des numérateurs, et donc une augmentation relative du dénominateur, qui correspond à la teneur en carbone. On met donc en évidence un enrichissement relatif en carbone.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Suggestion de question supplémentaire :

2. Proposer des hypothèses sur l'obtention expérimentale de ce graphique.
Ce graphique est obtenu par étude de matières fossiles (hydrocarbures) et d'échantillons de matière organique (de trois origines). Chauffés, les teneurs retrouvées dans les échantillons sont comparées à celles des hydrocarbures.

Sources/Bibliographie :

- M. Renard et al., *Eléments de géologie*, 16ème édition du Pomerol (2018).

Ressources pour aller plus loin :

- Diagramme de Van Krevelen : https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Van_Krevelen.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

1. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine terrestre.
Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine terrestre est de 0,8 mg de CH/g de COT.

2. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine lacustre.
Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine lacustre est de 1,25 mg de CH/g de COT.

3. Indiquer le rapport initial H/C de la matière organique d'origine marine.
Le rapport initial H/C de la matière organique d'origine marine est de 1,5 mg de CH/g de COT.

4. Préciser pour quelle matière organique l'enrichissement en carbone est le plus important.
La matière organique d'origine marine voit son enrichissement en carbone le plus important (passage de 1,5 à 0,5 H/C).

5. Montrer que l'évolution de la matière organique s'accompagne d'un enrichissement en carbone.
Sur le document, on note qu'il y a 3 origines possibles pour la formation de matière organique fossile :

- origine marine ;
- origine lacustre ;
- origine terrestre.

Indépendamment de ces trois origines possibles, les rapports O/C et H/C diminuent toujours pour former des combustibles fossiles. Une baisse de ces rapports traduit surtout une diminution des numérateurs, et donc une augmentation relative du dénominateur, qui correspond à la teneur en carbone. On met donc en évidence un enrichissement relatif en carbone.

6. Proposer des hypothèses sur l'obtention expérimentale de ce graphique.
Ce graphique est obtenu par étude de matières fossiles (hydrocarbures) et d'échantillons de matière organique (de trois origines). Chauffés, les teneurs retrouvées dans les échantillons sont comparées à celles des hydrocarbures.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 30)

15. Les dépôts du bassin de Graissessac (Hérault, France)

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

Correction :

1. Pour obtenir un dépôt de 2 mètres avec une sédimentation de 0,1 mm/an, il faudra 20 000 ans.

$$\frac{2\,000}{0,1} = 20\,000 \text{ ans}$$

2. Les filons de charbon se forment par accumulation de matière organique rapidement recouverte de sédiments détritiques, dans un milieu inondé. Après quelques centaines de millions d'années (augmentation de la pression, de la température) et un enrichissement en carbone, la matière organique se transforme en charbon.

3. Le charbon, comme le pétrole, est une ressource fossile non renouvelable, car le temps de formation de cette ressource (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de millions d'années) est infiniment plus long que sa vitesse de consommation, à l'échelle d'une vie humaine.

Ressources pour aller plus loin :

- Jean-Claude Lataillade, « Graissessac, autrefois… », *Saga Information*, n°359 (2017) : http://www.saga-geol.asso.fr/Documents/Saga_359_Graissessac.pdf.

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Étudier le cycle biogéochimique du carbone

1. Calculer la durée nécessaire pour obtenir un dépôt de 2 mètres, avec une vitesse de formation d'environ 0,1 mm/an.

Pour obtenir un dépôt de 2 mètres avec une sédimentation de 0,1 mm/an, il faudra 20 000 ans.

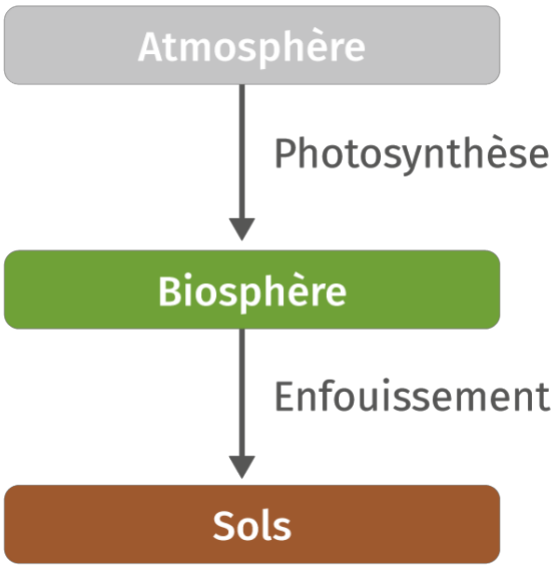
$$\frac{2\,000}{0,1} = 20\,000 \text{ ans}$$

2. Indiquer quels réservoirs de carbone ont été impliqués dans la formation de ce charbon.

L'atmosphère, la biosphère et les sols, sont les principaux réservoirs de carbone qui sont intervenus dans la formation de ce charbon, avec des flux de carbone entre eux.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

3. Représenter sous la forme d'un schéma simplifié les transferts de carbone ayant eu lieu entre les différents réservoirs amenant à la formation de ce charbon.



16. Les défis de la terraformation de Mars

Compétence principalement travaillée : Déterminer l'état physique de l'eau pour une température et une pression données

Correction :

1. La forte teneur en dioxyde de carbone, l'absence de dioxygène, les températures négatives (jusqu'à -140 °C) rendent l'atmosphère de Mars inhospitalière.

2. Pour terraformer Mars, il faut de l'eau sous forme liquide et il faut apporter du dioxygène, ou le former sur place. Un autre problème est celle des vents solaires, notamment à cause des radiations : il conviendra de se protéger un maximum.
Les solutions possibles peuvent être un apport d'eau depuis la Terre, la formation du dioxygène sur place (par exemple par installation de végétaux réalisant une photosynthèse), une modification du sol (régolithe) avec un apport de matière organique.

Ressources complémentaires :

- Un épisode de la série Data Science sur Arte, intitulé « On pourra bientôt vivre sur Mars » : https://www.arte.tv/fr/videos/081077-016-A/data-science-vs-fake/.
Intéressant, mises à part quelques imprécisions scientifiques.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Le coin des experts (p. 31-32)

17. Ozone stratosphérique et chlorofluorocarbures

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

Correction :

1. Les CFC représentent un danger pour la vie sur Terre, car ils ont une action néfaste sur la couche d'ozone. Ils dissocient progressivement les molécules d'ozone. Or, l'ozone filtre les UV émis par le Soleil et ces UV sont des agents mutagènes qui altèrent l'ADN des êtres vivants. Ils ont donc un effet délétère sur les êtres vivants.

2. Les CFC contribuent, par action de l'atome de chlore, à la dissociation des molécules d'ozone.

3. On note une diminution de la teneur en ozone au niveau du pôle sud entre 1979 et 1998. Après la mise en place du protocole de Montréal, en 1985, visant à interdire l'utilisation de CFC, on peut observer en 2012 une régression positive. La couche d'ozone s'épaissit de nouveau au dessus de l'Antarctique.

Sources/Bibliographie :

- Le protocole de Montréal : https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenariats-organisations/appauvrissement-couche-ozone-protocole-montreal.html.

Ressources complémentaires :

- Une vidéo de « Brut » (France TV) sur le protocole de Montréal : https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/video-comment-le-protocole-de-montreal-a-t-il-contribue-a-sauver-la-couche-d-ozone_3718427.html.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Mettre en relation la production de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère avec des indices géologiques

1. Résumer en une phrase l'action des CFC.
Les CFC contribuent, par action de l'atome de chlore, à la dissociation des molécules d'ozone.

2. Décrire l'évolution de la couche d'ozone entre 1979 et 2012.
En 1979, au-dessus de l'Antarctique, l'épaisseur de la couche d'ozone est d'environ 250 Dobson. En 1998, l'épaisseur n'est plus que de 100 à 150 Dobson environ. En 2012, on a un retour à une épaisseur de 250 Dobson.

3. En déduire l'impact du protocole de Montréal signé en 1985.
Après la mise en place du protocole de Montréal, en 1985, visant à interdire l'utilisation de CFC, on observe en 2012 une régression positive. La couche d'ozone s'épaissit de nouveau au-dessus de l'Antarctique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

18. Expériences de Miller et de Birkeland : des modélisations physiques historiques

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

Correction :

1. Les éléments de l'expérience de Miller font référence à :
- « Arcs électriques » : éclairs présents pendant un orage ;
- « Gaz » : gaz présents dans l'atmosphère primitive ;
- « Eau » : océan.

2. Miller obtient des bases azotées et des acides aminés dans son expérience. Ces éléments sont les briques de base des protéines et de l'ADN, et donc de constituants majeurs des êtres vivants. On peut ainsi supposer que l'apparition de ces « briques élémentaires » a aboutit à l'émergence des êtres vivants.

3. L'expérience de Birkeland se base sur une Terrella, un dispositif expérimental permettant d'étudier les propriétés électromagnétiques de la Terre. Ce système est constitué d'une boule aimantée (avec un pôle nord et un pôle sud) placée dans une chambre à vide, et soumis à un champ magnétique.
La boule représente la Terre, le champ magnétique celui qui existe sur Terre.
Les particules des vents solaires arrivent à la Terre et sont déviés vers les pôles (doc. 4). Il y a alors formation d'aurores. C'est ce que Birkeland essaie de recréer avec son dispositif.

L'interaction entre le champ magnétique induit et les particules produisent des aurores. C'est l'interaction entre les particules de la haute atmosphère présentes grâce à la magnétosphère et les particules solaires (ici, le faisceau d'électrons). Du fait de l'excitation des atomes, il y a émission de photons, donc production de lumière.

4. Le champ magnétique terrestre dévie les vents solaires. Cela permet d'une part de diminuer l'envol des molécules de l'atmosphère, et d'autre part limite les effets ionisants de ces vents. Tout cela favorise le développement et le maintien de la vie sur Terre.

Suggestion de question supplémentaire :

5. Expliquer l'intérêt des modélisations réalisées en sciences.
En sciences, la réalisation de modélisations permet d'étudier des phénomènes naturels à l'échelle d'un laboratoire. Des systèmes naturels complexes peuvent ainsi être miniaturisés, ou des conditions présentes sur Terre il y a plusieurs milliards d'années recréées.

Sources/Bibliographie :
- Le dispositif expérimental de Terrella : https://fr.wikipedia.org/wiki/Terrella.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Analyser des données en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère

1. Indiquer quelle composition de l'atmosphère Stanley Miller essaie de reconstituer dans son expérience de 1953.
Miller place dans son globe des gaz supposés présents lors de la formation de la Terre, donc d'une composition proche de l'atmosphère primitive.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Doc. 1. Identifier à quoi peut correspondre, sur Terre, chacun des trois termes surlignés en jaune.
Les éléments de l'expérience de Miller font référence à :
- « Arcs électriques » : éclairs présents pendant un orage ;
- « Gaz » : gaz présents dans l'atmosphère primitive ;
- « Eau » : océan.

3. Proposer une interprétation à l'expérience de Miller à partir des résultats obtenus, sachant que les bases azotées et les acides aminés sont des constituants des êtres vivants.
Miller obtient des bases azotées et des acides aminés dans son expérience. Ces éléments sont des constituants majeurs des êtres vivants et on peut ainsi supposer que l'apparition de ces « briques élémentaires » a abouti à l'émergence des êtres vivants.

4. Indiquer ce que Kristian Birkeland tente de reproduire dans son expérience de Terrella.
Birkeland tente de créer un champ électromagnétique autour d'une boule aimantée représentant la Terre, afin de comprendre la formation des aurores boréales.

5. Expliquer l'effet du champ magnétique terrestre sur les vents solaires.
Le champ magnétique terrestre dévie les vents solaires qui n'atteignent ainsi majoritairement pas la surface de la Terre.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 2 : La complexité du système climatique

Présentation 2

Activités 4
- Activité documentaire 1 : Climatologie et météorologie (p. 34-35) 4
- Activité documentaire 2 : Le climat global de la Terre et son évolution (p. 36-37) 7
- Activité documentaire 3 : Les indices des variations climatiques récentes (p. 38-39) 10
- Activité documentaire 4 : Le réchauffement climatique global actuel (p. 40-41) 14
- Activité de groupe 5 : Évolution de la température et rétroactions (p. 42-43) 18
  - Groupe 1 : Rôle de l'océan 18
  - Groupe 2 : Rôle des surfaces gelées 19
  - Groupe 3 : Rôle de la végétalisation 19
  - Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 19

Bilan (p. 45) 22

Exercices 24
- Zone d'échauffement (p. 46) 24
- L'atelier des apprentis (p. 47) 24
- Le repaire des initiés (p. 48-49) 27
- Le coin des experts (p. 50) 30

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation

Ce chapitre permet de remobiliser les différences entre météorologie et climatologie afin d'expliquer le réchauffement climatique actuel et ses conséquences possibles. En montrant qu'il y a déjà eu des variations climatiques par le passé, les élèves peuvent relever les indices d'un réchauffement climatique actuel et montrer que ce dernier est principalement dû aux activités humaines.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Les élèves ont étudié les impacts de l'exploitation des agrosystèmes, avec notamment une pollution possible des sols, de l'eau et de l'air. En lien avec ce qui a été vu en cycle 4, les élèves ont pu associer activité humaine et réchauffement climatique.

Ce qui a été enseigné en première :

- En enseignement scientifique, les élèves ont appris que la Terre reçoit de l'énergie solaire à l'origine de sa température de surface. Cette énergie détermine les climats et les saisons. Elle est également à l'origine d'une émission d'infrarouges par la surface de la Terre et absorbée en partie par l'atmosphère. Elle crée ainsi un équilibre appelé « effet de serre » qui explique la température moyenne à la surface de la Terre.
- En spécialité SVT, les élèves ont principalement étudié le fonctionnement des écosystèmes et les conséquences des activités humaines sur ces écosystèmes.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Ce chapitre s'appuie sur les connaissances de la composition de l'atmosphère et de son évolution vues au chapitre 1 et permet de comprendre dans le chapitre 3 comment les scientifiques tentent de prévoir les variations climatiques et leurs conséquences à moyen terme.

Bibliographie :

➢ **Ouvrages**
- A. Foucault, *Climatologie et paléoclimatologie*, 2016, Dunod : un classique qui permet de revoir les fondements de la climatologie et les méthodes d'étude des climats du passé.
- J-Y. Daniel et coll., *Sciences de la Terre et de l'Univers*, 2014, Vuibert : un ouvrage très complet niveau licence qui contient toute une partie sur les climats passés, présents et futurs.
- M. Renard et coll., *Eléments de géologie*, 16 édition (2018) : les bases de la géologie sont présentes dans ce livre, un indispensable pour tout enseignant.

➢ **Revues de vulgarisation scientifique**
- Collectif « Climat, Relever le défi du réchauffement », *Pour la science*, octobre 2015, dossier n°89.
- Collectif « La montée des océans, jusqu'où ? », *Pour la science,* février 2010, n°388.
- B. Dessus, « Le méthane, un gaz qui pèse lourd sur le climat », *La Recherche*, novembre 2017, n°529.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sitographie :

- L'ensemble des rapports et études du GIEC, une vraie mine d'informations pour ce chapitre et le suivant : https://www.ipcc.ch/.
- Le site de la NASA contient des données récentes actualisées régulièrement ainsi que des vidéos et animations pour comprendre les changements climatiques actuels : https://climate.nasa.gov/.
- Il existe une revue en ligne de l'atmosphère et du climat présidée par Jean Jouzel avec de nombreux articles en lien avec le chapitre : http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/14834.
- Un très bon article de Pierre Thomas sur les variations climatiques au cours de l'histoire de la Terre : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/variations-climatiques-bases.xml.
- Une conférence de Laurent Bopp sur le rapport 2019 du GIEC qui permet de bien comprendre les enjeux : https://www.youtube.com/watch?v=qDJ1ahZP7YE.

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Il est possible de faire travailler les élèves par groupe de 4 ou 5 sur différentes régions françaises afin de caractériser les climats des régions et de comprendre comment construire la carte de l'activité 1. Avec un fichier collaboratif, cette séance sur météo et climat devient une séance de groupe.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activités

Dans ce chapitre, après avoir compris la différence entre météorologie et climatologie, les élèves découvrent pas à pas les mécanismes complexes qui régissent le système climatique terrestre, ainsi que les boucles de rétroaction impliquées.
Différents exemples de processus, d'archives ou d'indicateurs sont étudiés.

Activité documentaire 1 : Climatologie et météorologie (p. 34-35)

Cette activité permet d'ancrer la distinction entre météorologie et climatologie, dans la continuité de ce qui a été vu en cycle 4, en s'appuyant notamment sur la diversité des paramètres mesurés. C'est nécessaire à la compréhension de changements climatiques et à la différenciation entre un événement météorologique ponctuel et un événement climatique qui intervient sur une plus grande échelle de temps.

Lien avec le programme :

- Partie 1.2. du programme « la complexité du système climatique » en lien avec les trois premières phrases sur la définition du climat et la différence entre météorologie et climatologie.

Objectifs notionnels :

- Un climat est défini par un ensemble de moyennes de grandeurs atmosphériques observées dans une région donnée pendant une période donnée. Ces grandeurs sont principalement la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents.
- La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires, etc.).
- La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines).

Objectifs méthodologiques :

- Distinguer sur un document des données relevant du climat d'une part, de la météorologie d'autre part.

Durée estimée : 30 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Climats en France métropolitaine et dans les DROM
Cette carte montre la répartition des climats sur le territoire français, ainsi que les caractéristiques générales du climat de la France. Il permet aux élèves de comprendre qu'un climat peut être défini à différentes échelles car il concerne une région plus ou moins grande.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 2 : Climat en Île-de-France (IdF) et en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA)
Ce tableau permet de comparer plusieurs paramètres climatiques entre l'Île-de-France et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il permet d'identifier ce qu'est un paramètre climatique.

Document 3 : Des températures mesurées à Paris en juillet 2019
Ce graphique permet de comprendre la différence entre les paramètres météorologiques et les données climatiques. Cela aide les élèves à comprendre que les paramètres météorologiques peuvent s'écarter des moyennes climatiques.

Document 4 : Météo et climat
Ce document permet de présenter de manière synthétique la différence entre météorologie et climatologie, en insistant sur la durée nécessaire à la définition d'un climat.

Réponses attendues aux questions :

1. Le climat méditerranéen est caractérisé par des températures moyennes comprises entre 12 et 19 °C avec 7h30 d'ensoleillement en moyenne, des précipitations rares (90 jours de pluie) mais abondantes avec 880 $L \cdot m^{-2}$ par an. Il ne neige pas sous ce climat et les jours de vents forts sont rares avec 24 jours par an.
Le climat méditerranéen est plus chaud que le climat océanique, aussi bien pour les températures minimales que pour les températures maximales. L'ensoleillement est de 50 % plus élevé pour le climat méditerranéen avec deux fois moins de jours de pluie. Cependant la pluviométrie est légèrement supérieure sous un climat méditerranéen ce qui indique que les épisodes pluvieux sont plus intenses.

2. Les températures maximales et minimales journalières sont des données météorologiques tandis que les températures moyennes minimales et maximales sont des données climatiques, car ce sont des moyennes sur 30 ans.

3. Météo et climat s'appuient sur la mesure de grandeurs atmosphériques dans une région donnée. Mais alors que la météorologie est l'étude des grandeurs atmosphériques à un instant donné et la prévision de leurs variations sur quelques jours, la climatologie correspond aux moyennes de ces paramètres climatiques sur 30 ans et donne donc un aperçu des grandeurs atmosphériques dans la région, sans prévisions possibles au quotidien et sans indiquer les variations extrêmes.

4. Bilan Par définition, le climat correspond aux moyennes des grandeurs atmosphériques dans une région donnée sur 30 ans. Ceci s'apparente donc aux moyennes des données météorologiques journalières de la température, de la pluviométrie, de la nébulosité, de la pression, etc. La caractérisation d'un climat s'appuie donc sur des données météorologiques.

Ressources complémentaires :

- Découvrez les climats des différentes régions de France avec l'application ClimatHD : http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd
- L'ensemble des données climatiques et météorologiques de nombreuses villes du monde : https://fr.climate-data.org/

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Un autre site qui donne des caractéristiques météorologiques et climatiques pour plusieurs grandes villes de France métropolitaine, compilées à partir des données de Météo France : http://www.meteo-paris.com/ile-de-france/climat.html

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 2 : Le climat global de la Terre et son évolution (p. 36-37)

L'objectif de cette activité est d'identifier la température comme un indicateur global du climat tout en montrant que le climat a varié naturellement dans le passé. Le message important à faire passer est que le réchauffement climatique n'a jamais été aussi rapide qu'actuellement.

Lien avec le programme :

- Dans cette partie 1.2 sur la complexité des systèmes climatiques, les points 4, 5 et 6 sont abordés.

Objectifs notionnels :

- La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures *in situ* et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global.
- Le climat de la Terre présente une variabilité naturelle sur différentes échelles de temps.
- Depuis un siècle et demi, on mesure un réchauffement climatique global (environ +1 °C).

Objectifs méthodologiques :

- Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques.

Durée estimée : 55 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Principe de la mesure des températures à la surface de la Terre depuis l'espace

Le document rappelle que les températures moyennes dépendent de la latitude et qu'elles peuvent être mesurées par satellite en appliquant la loi de Wien étudiée en classe de première.

Document 2 : Variation des températures déterminées à la surface de la Terre et par satellite depuis 1975

Ce graphique met en évidence une hausse de température moyenne d'environ 0,5 °C en 30 ans, aussi bien d'après les mesures directes que d'après les mesures réalisées par satellites, ce qui montre la fiabilité des mesures par satellite.

Document 3 : Variation des températures moyennes à la surface de la Terre depuis 400 000 ans

Ce document montre qu'il existe des variations naturelles des températures moyennes, avec une certaine périodicité. Par rapport à la moyenne 1960-1990, les variations vont d'une hausse de 2 °C à une baisse de 6 °C.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 4 : Variation de la température moyenne depuis 1850 à la surface de la Terre
Ce graphique montre une hausse des températures depuis la fin du XIXe siècle d'environ +1 °C.

Document 5 : Les forçages radiatifs du système climatique
Ce document introduit la notion de forçage radiatif qui sera utilisée dans les activités 4 et 5. Il s'agit de rappeler que la température à la surface de la Terre est la conséquence d'un bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par la Terre. Si la température augmente, c'est qu'elle reçoit plus d'énergie qu'elle n'en émet. Ce qu'il sera important de souligner par la suite, c'est que la réémission est diminuée du fait d'une plus forte action de l'effet de serre.

Réponses attendues aux questions :

1. D'après la loi de Wien, $\lambda_{\max} \times \mathrm{T} = 2,93 \times 10^{-3}$ donc $\lambda_{\max} = \dfrac{2,93 \times 10^{-3}}{\mathrm{T}}$

Application numérique avec une T = 293,15 K :
$\lambda_{max} = \dfrac{2,93 \times 10^{-3}}{293,15} = 0,000\ 009\ 948$ m soit environ 10 µm.
Une radiation de longueur d'onde λ_{max} ≈ 10 µm correspond à des infrarouges.

2. La puissance radiative émise est plus faible à l'équateur qu'aux tropiques. Ceci pourrait être dû à l'inclinaison de la Terre qui implique que les tropiques reçoivent davantage d'énergie lumineuse que l'équateur, ou bien cela pourrait résulter d'une redistribution de l'énergie solaire de l'équateur vers les tropiques du fait des courants atmosphériques et océaniques.

3. D'après les courbes de tendances, la température s'est élevée de presque 0,5 °C en 30 ans. En déterminant le coefficient directeur des courbes de tendance, on trouve une élévation moyenne de température de 0,016 °C/an entre 1980 et 2010. Entre 1850 et 1900, les températures moyennes oscillent autour d'une même valeur, mais les variations moyennes sur la période sont nulles ou inférieures à 0,1 °C. Ceci correspond à une hausse maximale de 0,002 °C/an, ce qui est 8 fois plus faible qu'entre 1980 et 2010. Il semble donc qu'il y ait une accélération du réchauffement climatique.

4. Sur les 400 000 dernières années, le graphique montre des variations cycliques de la température avec une période d'environ 100 000 ans. On remarque que des périodes avec un refroidissement lent de 5 à 7 °C sont suivies d'un réchauffement de même amplitude mais en un temps dix fois plus court. En calculant les vitesses moyennes de réchauffement et de refroidissement d'après ce graphique, on trouve environ :

Vitesse moyenne de refroidissement = $\dfrac{7}{60\ 000} = 1,16 \times 10^{-4}$ °C/an soit 0,000 116 °C/an.

Vitesse moyenne de réchauffement = $\dfrac{7}{10\ 000} = 7 \times 10^{-4}$ °C/an soit 0,000 7 °C/an.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ces résultats montrent que les phases de réchauffement sont plus rapides que les périodes de refroidissement.

5. Un forçage radiatif correspond à un déséquilibre entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système, entraînant une variation de température du système étudié. Un système climatique correspond à l'ensemble des enveloppes d'une planète (ici de la planète Terre) qui contribuent à l'absorption ou à l'émission d'une énergie radiative, contribuant donc au climat de la planète.

6. Bilan Il existe des variations naturelles de la température moyenne terrestre avec une variation périodique de 8 °C sur 100 000 ans environ. Si les réchauffements sont rapides et les refroidissements lents, le réchauffement observé depuis 1850 est 10 à 100 fois plus rapide que ce qui a été observé sur les 400 000 dernières années.

Ressources complémentaires :

- Une vidéo d'approfondissement par Jean Jouzel qui fait le lien avec le programme de l'enseignement de spécialité à propos de l'apport de l'analyse des carottes de glace sur les variations du climat passé : https://www.canal-u.tv/video/ipsl/que_mesure_t_on_dans_une_carotte_de_glace_jean_jouzel.50953
- Un site qui regroupe de nombreuses données climatiques avec des animations, des synthèses d'images satellitales et des ressources pédagogiques : https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/variations-climatiques-dernier-millenaire/

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 3 : Les indices des variations climatiques récentes (p. 38-39)

Cette activité permet aux élèves d'analyser quelques indices qui reflètent des variations climatiques, aussi bien actuelles que dans un passé proche.

Lien avec le programme :

- En complément de ce qui a été vu dans l'activité précédente, il s'agit du quatrième point travaillé sur les indicateurs des variations du climat global.

Objectifs notionnels :

- Il existe d'autres indicateurs du climat global : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers, etc.

Objectifs méthodologiques :

- Identifier des traces géologiques de variations climatiques passées (pollens, glaciers).
- Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (date de vendanges, niveau de la mer, extension d'un glacier, etc.)

Durée estimée : 45 minutes, 90 minutes en cas de réalisation des préparations microscopiques des pollens et de la reconstitution des climats du passé.

Présentation des documents

Document 1 : Variation du niveau marin
Ce graphique montre que le niveau marin monte régulièrement depuis un siècle.

Document 2 : Variation de l'étendue des glaciers
Cette infographie montre le recul du front d'un glacier depuis 1942. Elle est à mettre en relation avec la hausse du niveau marin vue au document précédent.

Document 3 : Variation d'épaisseur du permafrost
Ce document explique ce qu'est le permafrost et montre sa fonte dans certains points de Sibérie. La fonte traduit bien un réchauffement climatique. Ce document permet aussi d'introduire la notion de rétroaction positive, car les sols gelés du permafrost contiennent de grandes quantités de gaz à effet de serre, qui amplifieraient le réchauffement climatique en cas de fonte du permafrost, accélérant alors la fonte de ces terrains.

Document 4 : Végétation et climat : des outils et des archives climatiques
Ce graphique permet de relier un type de végétation à des conditions climatiques. La découverte d'associations de pollens, et donc d'associations végétales du passé permet de reconstituer le climat qui régnait dans la région, nommé paléoclimat. Les modifications de la végétation sont donc des indicateurs de variations climatiques.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Document 5 : Pollens des tourbières et climats du passé
Ces graphiques permettent de montrer les associations polliniques présentes dans une tourbe et de mettre en évidence des variations climatiques dans la région de Corse étudiée.

Réponses attendues aux questions :

1. Calcul des variations moyennes du niveau marin entre 1900 et 1990 (notée $Hm_{1900-1990}$) puis entre 1990 et 2010 (notée $Hm_{1990-2010}$)

$$Hm_{1900-1990} = \frac{-0,02-(-0,15)}{1\ 990-1\ 900}$$

$Hm_{1900-1990} = 1,4 \times 10^{-3}$m/an soit 1,4 mm par an

$$Hm_{1990-2010} = \frac{0,04-(-0,02)}{2\ 010-1\ 990}$$

$Hm_{1990-2010} = 3 \times 10^{-3}$ m/an soit 3 mm par an.

Le niveau marin monte donc deux fois plus rapidement depuis 20 ans que depuis le siècle dernier.

2. Entre 1942 et 2006, le glacier de Jakobshavn a reculé de près de 16,5 km, d'après l'échelle. La fonte est plus élevée que la prise de glace, donc les températures sont globalement plus chaudes depuis 1942.
De même, le document 3 montre une diminution de l'épaisseur du permafrost de près de 50 cm en 20 ans. Cette fonte traduit bien un réchauffement climatique dans ces régions de l'hémisphère nord. L'ensemble de ces données sont des indices d'un réchauffement climatique global qui concerne au moins tout l'hémisphère nord.

3. Une rétroaction correspond à une action en retour d'un phénomène sur le phénomène de départ. Ainsi, un phénomène A cause un phénomène B qui amplifie ou diminue le phénomène A. Une rétroaction positive peut être illustrée dans le cas de la fonte du permafrost causée par le réchauffement climatique.

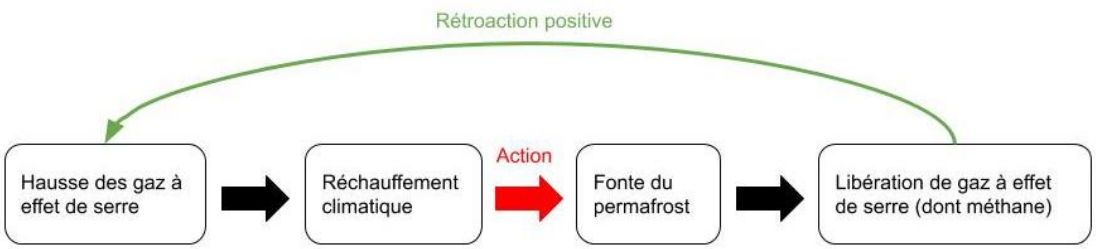


Schéma d'une rétroaction positive du permafrost sur le réchauffement climatique.

Document sous licence libre Creative Commons

4. Chaque espèce végétale se développe dans des conditions climatiques particulières. Par exemple, certaines espèces comme le hêtre ne vivent que dans des régions avec des saisons contrastées et des pluies importantes l'été. Ainsi, les pollens découverts dans une région permettent d'identifier les espèces qui y vivent et donc de déterminer le climat qui règne dans cette zone. L'analyse d'échantillons d'anciennes associations de pollen permet donc de reconstituer le climat qui régnait à l'époque dans la région, conformément au principe d'actualisme.

5. Il y a 5 000 à 10 000 ans, la végétation dominante en Corse était formée d'aulnes glutineux et de pins laricio, ce qui traduit, d'après le document 4, des étés courts et peu chauds et des hivers froids et longs, le tout dans un climat plutôt sec.
Il y a 2 700 à 5 000 ans, la végétation a changé avec l'apparition de chênes verts et de bouleaux qui sont devenus majoritaires, ce qui indique un réchauffement du climat avec des précipitations plus abondantes l'été.
Depuis 2 700 ans, le climat est à peu près le même en Corse, sauf récemment, où les bouleaux semblent moins nombreux au profit du chêne vert et du pin laricio, ce qui pourrait indiquer un climat plus sec dans cette région.

Protocoles et résultats expérimentaux

Observation de pollens et reconstitution de climats du passé.

Matériel nécessaire :

- microscope,
- pollen extrait de carotte de tourbe ou extrait d'un miel,
- fiche de reconnaissance des pollens,
- un ordinateur avec le logiciel Paléobiomes téléchargeable sur le site de l'IFÉ (http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/paleobiomes/enseigner/propositions-dactivites-avec-le-logiciel-paleobiomes/activite-les-diagrammes-polliniques) ou un fichier de détermination des préférences climatiques de quelques espèces végétales.

Pour gagner du temps, il est conseillé d'utiliser des préparations de pollen déjà prêtes plutôt que de faire réaliser l'extraction du pollen par les élèves.

Protocole :
Le protocole détaillé pour l'extraction et les explications associées se trouve sur le site de l'IFÉ (Institut Français de l'Éducation) :
http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/systemclim/gulf-stream/pages_gulfstream/dosstech/techpaleoclim/pollens

- prélever une goutte de suspension de pollen et la déposer sur une lame,
- ajouter une goutte de Safranine,
- recouvrir la préparation d'une lamelle,
- observer au microscope,
- identifier les différentes familles de pollen à l'aide de la clé de détermination fournie,

Document sous licence libre Creative Commons

- ouvrir le logiciel Paléobiomes et reconstituer les conditions climatiques en retrouvant les préférences climatiques de chaque espèce étudiée.

Résultats attendus :
La clé de détermination permet d'identifier les espèces végétales et donc d'identifier un climat. On peut donner par exemple celle qui était fournie lors de l'évaluation des compétences expérimentales jusqu'en 2020 :
http://svt.ac-creteil.fr/IMG/pdf/cle_palynologie.pdf.

Ressources complémentaires :

- Le site de l'INRAP explique en détail la palynologie et illustre la démarche en vidéo : https://www.inrap.fr/les-sciences-de-l-archeologie/La-palynologie
- Un cours public très complet (1h36) au Muséum sur la palynologie : https://www.youtube.com/watch?v=88CrdQVffDw
- L'accès à la base de données fossile européenne pour explorer une grande diversité de sites : http://www.europeanpollendatabase.net/fpd-epd/
- Pour mieux comprendre ce qu'est le permafrost et aller plus loin dans la notion de rétroaction positive en lien avec l'activité 5 : https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/le-permafrost/
- Pour comprendre comment on étudie les glaciers : https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/glaciers-montagne-changements-climatiques/

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 4 : Le réchauffement climatique global actuel (p. 40-41)

Cette activité permet de comprendre le rôle des actions humaines dans le réchauffement climatique global, en lien avec l'émission de gaz à effet de serre qui augmente depuis plus d'un siècle. L'essentiel du forçage radiatif entraîne une accumulation d'énergie principalement par les océans.

Lien avec le programme :

- Il s'agit du second bloc de savoir du point 1.2. du programme sur la complexité du système climatique.

Objectifs notionnels :

- Le réchauffement climatique global est la réponse du système climatique à l'augmentation du forçage radiatif (différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise) due aux émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère : CO_2, CH_4, N_2O et vapeur d'eau principalement.
- Depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration du CO_2 atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement.
- Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre. Il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par le sol de la part de l'atmosphère.
- Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle.
- L'énergie supplémentaire associée est essentiellement stockée par les océans, mais également par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et par la montée du niveau des océans.

Objectifs méthodologiques :

- Déterminer la capacité d'un gaz à influencer l'effet de serre atmosphérique à partir de son spectre d'absorption des ondes électromagnétiques.
- Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (date de vendanges, niveau de la mer, extension d'un glacier, etc.).
- Analyser la variation, au cours du temps, de certaines grandeurs telles que l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO_2, la variation de température moyenne, des indicateurs de l'activité économique mondiale.

Durée estimée : 55 minutes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation des documents

➢ **Bloc documentaire liant le réchauffement climatique à la hausse des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine :**

Document 1 : Pouvoir d'absorption des principaux gaz à effet de serre
Ces graphiques remobilisent les connaissances des élèves sur la notion de gaz à effet de serre étudiée en Enseignement scientifique en première.

Document 2 : Teneur en CO_2 atmosphérique et réchauffement climatique
Ce graphique montre que la hausse des températures dans les modélisations dépend directement de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique.

Document 3 : Concentrations des principaux gaz à effet de serre depuis 1750
Ces trois graphiques montrent la hausse de la concentration en gaz à effet de serre depuis 1850.

Document 4 : Émissions de CO_2 d'origine humaine depuis 1850
Ce graphique montre que la hausse des émissions des gaz à effet de serre depuis 1850 est en partie liée à la déforestation, mais principalement à l'usage des combustibles fossiles et à la cimenterie, donc aux constructions actuelles.

➢ **Bloc documentaire liant réchauffement climatique et flux d'énergie radiative :**

Document 5 : Forçage radiatif pendant l'ère industrielle
Ce document montre que le forçage radiatif positif à la surface de la Terre est la conséquence des gaz à effet de serre émis par les activités humaines.

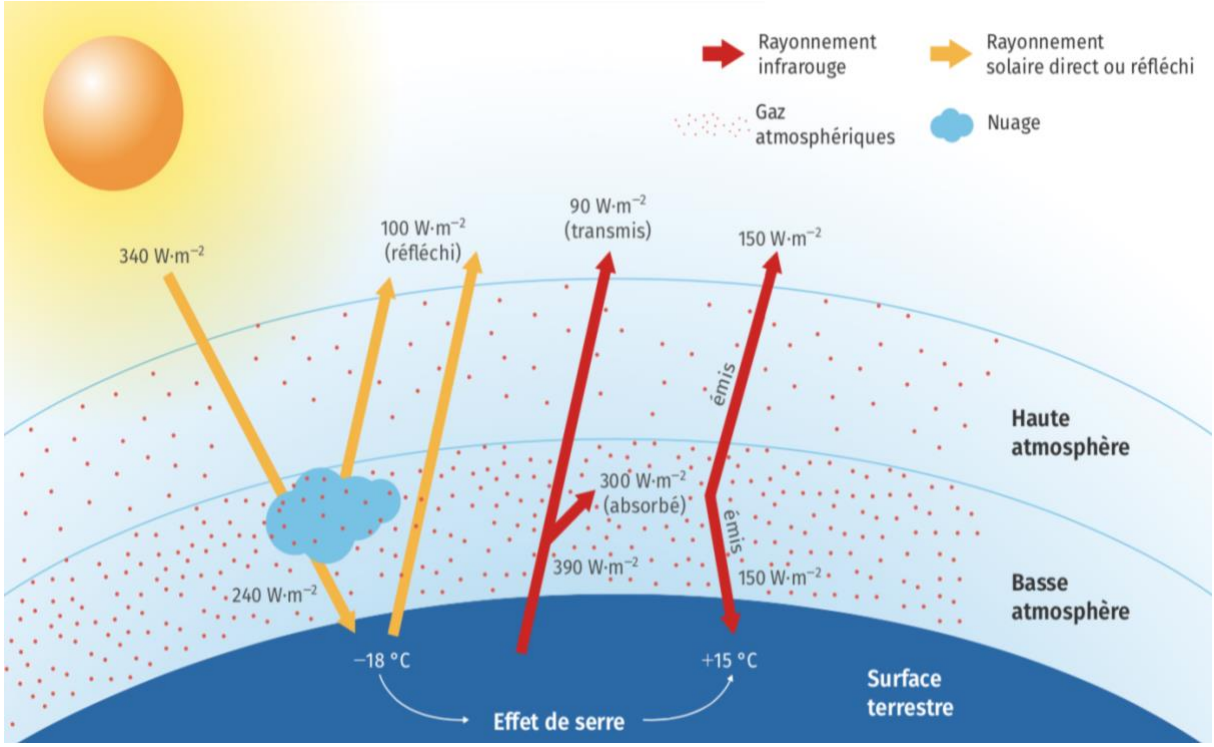
Document 6 : Réservoirs et énergie reçue
Ce graphique montre que l'excédent d'énergie radiative reçu à la surface de la Terre est absorbé par les océans, notamment les eaux de surface, et en faible partie par les continents et l'atmosphère. Cette accumulation d'énergie va affecter les océans, ne serait-ce que par une hausse de leur température.

Document 7 : Variation de la date des vendanges dans le Beaujolais depuis 1970
Le graphique montre l'avancée de la date des vendanges depuis 1970, donnant un indice supplémentaire du réchauffement climatique, mais permettant d'introduire également la notion de conséquences pour les activités humaines.

Réponses attendues aux questions :

1. Les principaux gaz à effet de serre sont l'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et le monoxyde d'azote.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA



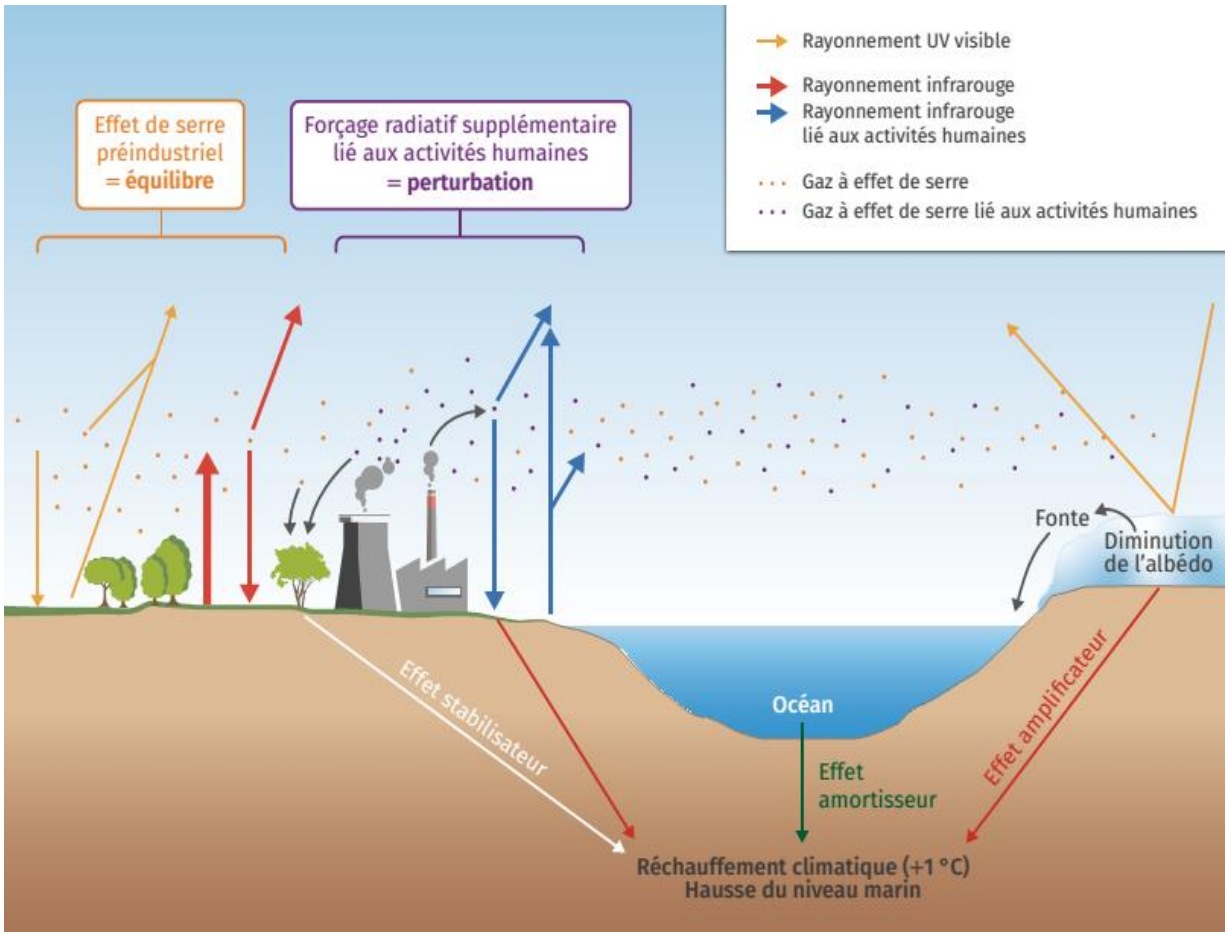
2. Le document 3 montre une hausse des gaz à effet de serre que sont le dioxyde de carbone, le méthane et le dioxyde d'azote, celle-ci étant plus rapide depuis 1950. C'est bien visible pour le dioxyde de carbone sur le document 4 avec une multiplication par quatre des émissions liées aux activités humaines depuis 1950. En corrélant ces hausses d'émissions depuis 1950 aux données du document 2, on peut en déduire que l'émission de gaz à effet de serre en lien avec les activités humaines contribue au réchauffement climatique. Enfin, le document 5, extrait du rapport du GIEC, montre que le forçage radiatif est lié uniquement aux activités humaines et notamment à l'émission de gaz à effet de serre.

3. En 1990, environ 100×10^{21} J sont accumulées par les eaux de surface et les eaux profondes océaniques. En 2010, c'est 2,5 fois plus d'énergie accumulée par les océans. Cette accumulation doit réduire en partie le réchauffement climatique, car l'essentiel de l'énergie est absorbée.

4. En 1970, les vendanges avaient lieu aux alentours du 26 septembre, puis du 18 septembre en 1980. Entre 2004 et 2014, ces vendanges ont eu lieu les premiers jours du mois de septembre. Ainsi, la date des vendanges a été avancée de plus de 3 semaines en 40 ans. La maturité des fruits dépendant de l'ensoleillement reçu et de la température en été, ce qui suggère que les étés sont plus chauds et plus ensoleillés qu'il y a 40 ans.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

5. Synthèse



Ressources complémentaires :

- Découvrez en vidéo les variations de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique depuis 800 000 ans : https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/2019/06/04/animation-of-keeling-curve-history-updated-to-include-2019-milestone/
- Les rapports du GIEC analysant les indices du réchauffement climatique, les causes de ce réchauffement et les conséquences envisageables : https://www.ipcc.ch
- Le site de l'encyclopédie de l'environnement synthétise et illustre l'origine des variations climatiques, avec des animations et des schémas, par exemple sur le forçage radiatif : https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/la-machine-climatique/#4_Forcages_et_retroactions

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité de groupe 5 : Évolution de la température et rétroactions (p. 42-43)

La dernière activité de ce chapitre permet d'illustrer la complexité du système climatique et la difficulté de prévoir précisément les conséquences et l'ampleur du réchauffement climatique du fait de nombreuses rétroactions. Certaines sont négatives et ralentissent le réchauffement climatique, d'autres sont positives et amplifient le réchauffement.

Lien avec le programme :

- Il s'agit du dernier bloc du point 1.2 sur la complexité du système climatique qui présente l'ensemble des interactions.

Objectifs notionnels :

- L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont :
  - l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ;
  - la décroissance de la surface couverte par les glaces et la diminution de l'albédo terrestre ;
  - le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère.
- L'océan a un rôle amortisseur en absorbant à sa surface une fraction importante de l'apport additionnel d'énergie. Cela conduit à une élévation du niveau de la mer causée par la dilatation thermique de l'eau. À celle-ci s'ajoute la fusion des glaces continentales.
- Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles.
- À court terme, un accroissement de la végétalisation constitue un puits de CO_2 et a donc un effet de rétroaction négative (stabilisatrice).

Objectifs méthodologiques :

- Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système.
- Réaliser et interpréter une expérience simple, mettant en évidence la différence d'impact entre la fusion des glaces continentales et des glaces de mer.
- Estimer la variation du volume de l'océan associée à une variation de température donnée, en supposant cette variation limitée à une couche superficielle d'épaisseur donnée.

Durée estimée : 60 minutes (25 minutes de préparation, 5 minutes de présentation par groupe et 10 minutes de synthèse).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Groupe 1 : Rôle de l'océan

Présentation des documents

Document 1 : La dilatation thermique de l'eau
Ce document présente le principe de dilatation thermique et montre que l'énergie radiative supplémentaire reçue, en augmentant la température de l'eau, entraîne une augmentation du volume des océans et donc une hausse du niveau marin.

Document 2 : L'inertie thermique de l'eau
La capacité calorifique de l'eau explique que la température de celle-ci augmente plus lentement pour une même quantité d'énergie reçue que s'il s'agissait du sol, ce qui confère aux océans un rôle amortisseur sur le réchauffement climatique.

Groupe 2 : Rôle des surfaces gelées

Présentation des documents

Document 3 : Glaciations et variations du niveau marin
Ce document met en évidence des variations du niveau marin dans le passé. Les amplitudes de ces variations peuvent atteindre plus de 100 m. Il permet de lier ces variations du niveau marin aux périodes glaciaires et interglaciaires. Ainsi, le réchauffement climatique induit la fonte des glaces qui contribue à l'essentiel des variations du niveau marin.

Document 4 : Surface des glaces et albédo terrestre
Ce document rappelle la notion d'albédo vue en Enseignement scientifique en première. En reliant les informations à celles du document 3, les élèves peuvent comprendre que la fonte des glaces suite au réchauffement climatique a une rétroaction positive sur le réchauffement climatique, car davantage d'énergie radiative sera absorbée par la surface de la Terre.

Groupe 3 : Rôle de la végétalisation

Présentation des documents

Document 5 : Photosynthèse et croissance des plantes
Ce document montre que la croissance des végétaux, notamment des forêts, permet de piéger une partie du dioxyde de carbone émis par les activités humaines dans les plantes grâce à la photosynthèse. La végétalisation a donc une rétroaction négative à court terme sur le réchauffement climatique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Pour une épaisseur de 1 000 m et un coefficient de dilatation de $2,6 \times 10^{-4}$ °C^{-1}, cela provoque une hausse de 2,6 m pour une hausse de température de 1 °C. Ainsi, le réchauffement climatique entraîne une élévation du niveau de la mer, ce qui modifie les écosystèmes et perturbe la vie des populations qui vivent sur les côtes.

2. L'inertie thermique des océans entraîne un refroidissement quatre fois plus lent que le reste de la surface de la Terre. À long terme, les effets du réchauffement climatique actuel se ressentiront encore, même si nous parvenions à inverser la tendance.

3. L'inertie thermique fait que l'eau s'échauffe moins vite que l'air, ce qui a un rôle amortisseur à court terme sur le réchauffement climatique.

Groupe 2 :

1. Dans le passé, le niveau de la mer était plus bas qu'actuellement de 130 m environ. Sachant qu'actuellement environ 2 % du volume total des océans se trouve emprisonné dans les glaces de l'Arctique, on peut supposer qu'une période glaciaire piégerait de l'eau sous forme de glace, contribuant à une baisse du niveau marin. De plus, les glaces ont un albédo 6 à 12 fois supérieur aux océans, ce qui réduit l'échauffement de la surface terrestre.
Ainsi, la fonte des glaciers a pour conséquence une hausse du niveau marin et une diminution de l'albédo, ce qui va amplifier les effets du réchauffement climatique.
La modélisation de la fonte des glaces montre que la fonte d'un glaçon dans l'eau ne modifie pas le volume total, alors qu'un glaçon sur une surface hors de l'eau (modélisation d'un glacier continental) entraîne une hausse du niveau marin.

2. Le réchauffement climatique entraîne une fonte des glaces. Or, l'eau a un albédo 6 à 12 fois plus faible que celui des glaces, ce qui amplifie l'absorption d'énergie radiative à la surface de la Terre et donc le réchauffement climatique. Ce dernier accélère alors la fonte des glaces. Il y a donc une rétroaction positive entre réchauffement climatique et fonte des glaces.

Groupe 3 :

1. L'activité photosynthétique des végétaux permet de stocker du dioxyde de carbone prélevé dans l'atmosphère sous la forme de matière organique. Les terres cultivées contribuent à libérer du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, tandis que les jeunes forêts en croissance, comme celles de France métropolitaine, stockent du carbone chaque année. En revanche, les forêts anciennes, comme la forêt guyanaise, n'ont pas d'influence sur les quantités de carbone atmosphérique. Ainsi, le développement de jeunes arbres et de nouvelles forêts a un effet amortisseur à court terme sur le réchauffement climatique. Cependant, à long terme les forêts n'agiront plus sur ce réchauffement climatique.

2. **Complément en utilisant les ressources numériques :** Depuis 1982, on observe au niveau mondial une tendance à l'augmentation du nombre de feuilles, donc une croissance des végétaux. Du fait de l'activité photosynthétique, ces derniers stockent le dioxyde de carbone sous forme de matière organique qui ne se retrouve pas dans l'atmosphère.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

La végétation en croissance a donc un effet amortisseur sur le réchauffement climatique en réduisant la hausse de la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Protocoles et résultats expérimentaux :

Fonte des glaces continentales ou de la banquise.

Matériel nécessaire :

- verre d'eau,
- glaçons,
- petite surface de bois sur laquelle déposer les glaçons.

Protocole :

- Remplir deux béchers d'eau jusqu'à un niveau repère (trait de feutre effaçable ou volume fixé sur le bécher).
- Ajouter un ou plusieurs glaçons dans le premier bécher (modélise la banquise).
- Dans le second bécher, placer les glaçons sur une planche légèrement inclinée vers le bécher, de sorte que l'eau issue de la fonte du glaçon rejoigne le bécher (modélise des glaces en domaine continental).
- Relever la hauteur d'eau au début de la modélisation et à la fin, lorsque le ou les glaçons ont fondu.
- Comparer les résultats et conclure sur l'effet de la fonte des glaces sur la variations du niveau marin.

Résultats attendus :

Les glaçons qui ont fondu directement dans le bécher n'ont pas modifié la hauteur d'eau dans ce dernier. En revanche, la hauteur d'eau a augmenté lorsque les glaçons n'étaient pas initialement dans le bécher.

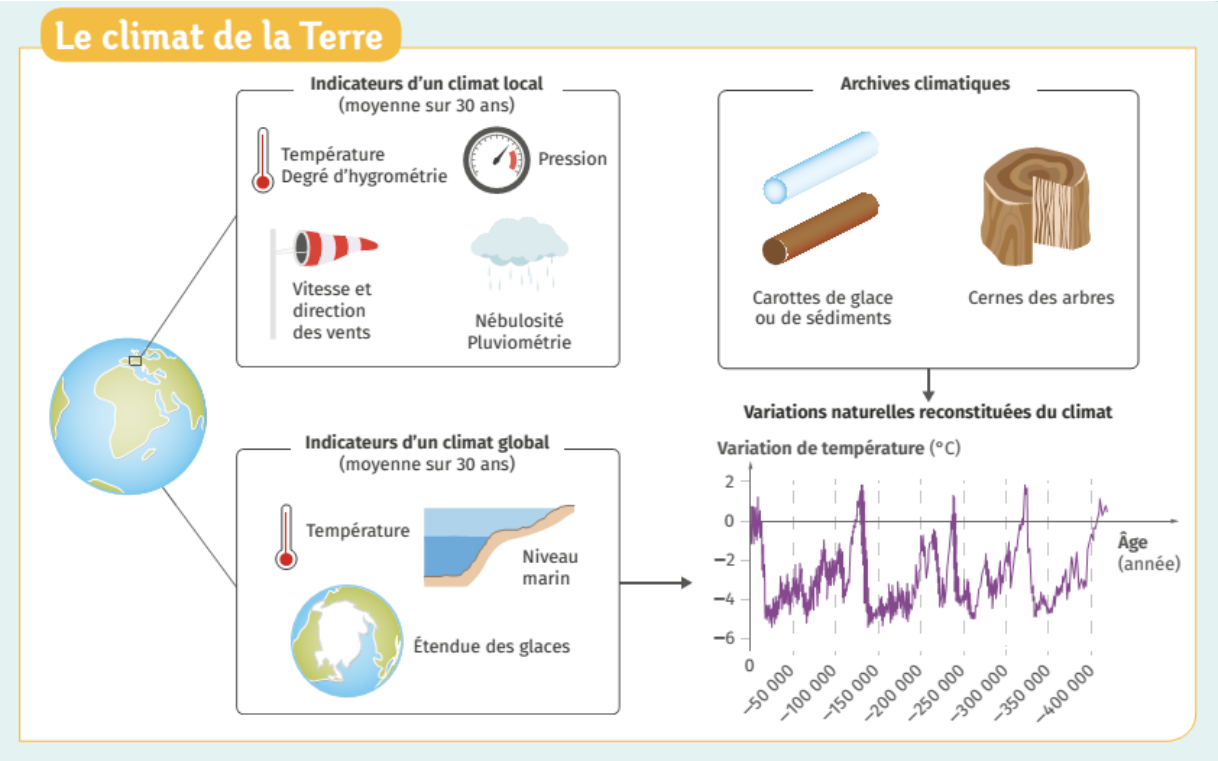
Par analogie, cette modélisation indique que la fonte de la banquise et des glaciers présents sur les mers et les océans ne devraient pas modifier significativement le niveau marin alors que la fonte des calottes glaciaires et des glaciers continentaux entraînerait une hausse du niveau marin correspondant au volume d'eau présent dans ces glaces.

Ressources complémentaires :

- Un dossier de l'ONF (Office National des Forêts) pour mieux comprendre le lien entre végétation et climat : http://www1.onf.fr/gestion_durable/++oid++4f4d/@@display_advise.htm
- Un article de Pierre Thomas sur le rôle de la végétalisation dans la composition de l'atmosphère : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/oxygene-Amazonie-poumon-Terre.xml
- Une conférence de Bernard Seguin sur le réchauffement climatique vu par les végétaux : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/climat-vegetaux-Seguin.xml

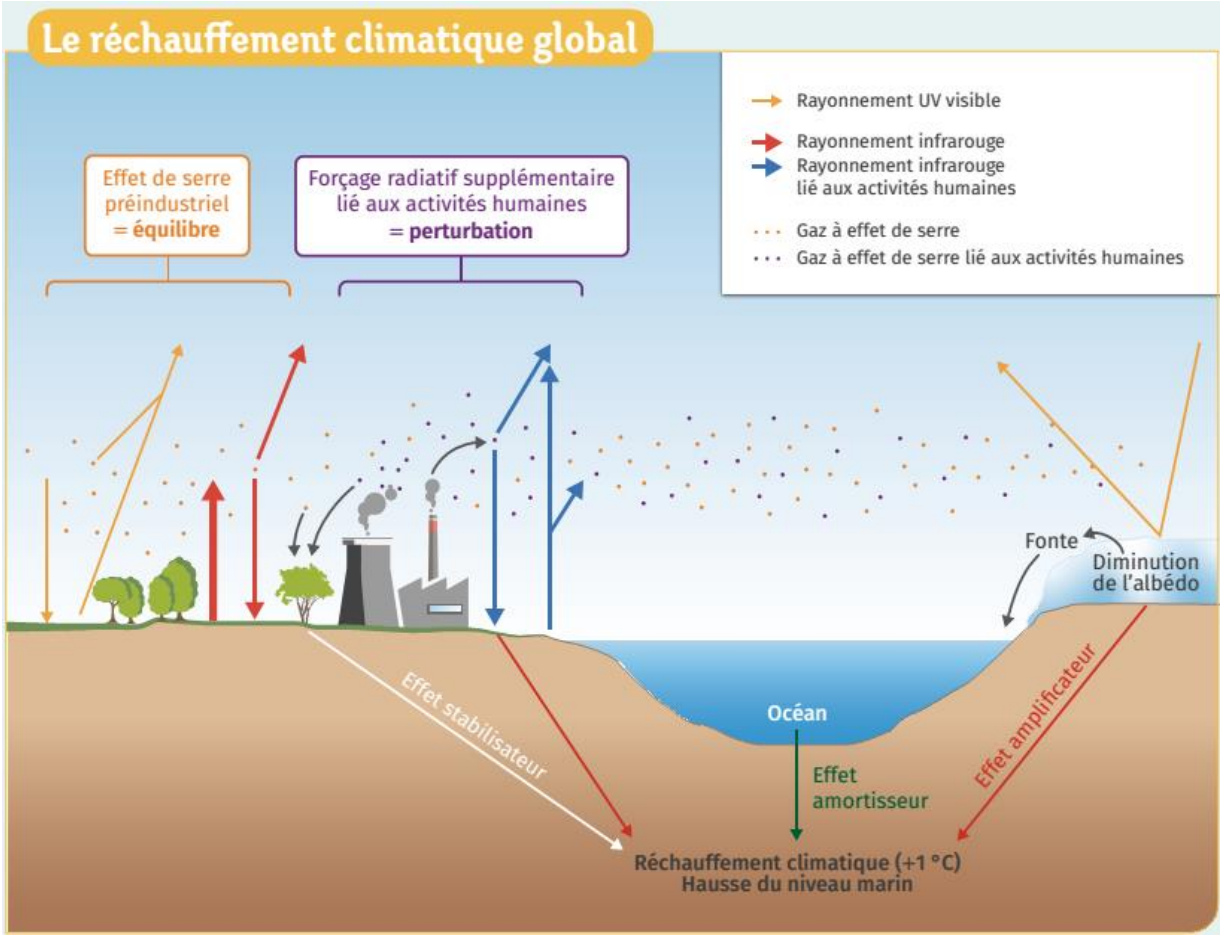
Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 45)



Le climat de la Terre correspond à la moyenne de paramètres climatiques (précipitation, température, etc.) sur 30 ans. Un climat peut être défini à l'échelle de la planète ou localement. Il existe différentes méthodes pour déterminer les variations passées du climat, ce qui est essentiel pour comprendre les variations actuelles et les conséquences possibles.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA



La température à la surface de la Terre est la conséquence d'un équilibre radiatif dû à l'énergie solaire reçue et à l'existence d'un effet de serre.
Les activités humaines augmentent la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, ce qui entraîne un forçage radiatif à l'origine du réchauffement climatique.
Ce réchauffement a différentes conséquences environnementales (montée des eaux, fonte du permafrost, etc.) ce qui complexifie la prévision de l'ampleur des changements climatiques du fait des rétroactions positives ou négatives que chaque situation entraîne.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 46)

1. Un épisode caniculaire comme celui qui a eu lieu en France en juillet 2019 est :

b. un phénomène météorologique.

2. Les gaz à effet de serre réchauffent la Terre à cause :

c. de l'absorption du rayonnement thermique infrarouge émis par la Terre.

3. L'océan a un effet amortisseur sur le réchauffement climatique, car :

b. l'inertie thermique de l'eau fait qu'elle s'échauffe moins vite que l'air.

4. Depuis 150 ans, la température moyenne à la surface de la Terre :

a. a augmenté de 1 °C.

5. Il n'est pas possible de déterminer les variations climatiques passées en :

c. utilisant les données météorologiques actuelles pour reconstituer les variations à leur origine.

6. D'après le graphique des variations de la température et des gaz à effet de serre ci-dessous :

c. il y a corrélation entre les variations des concentrations en CO_2 et CH_4 et les variations de température, mais on ne peut pas conclure.

7. Discuter ce tweet, daté du 22 novembre 2018, du président américain Donald Trump :

« Une vague de froid brutale et prolongée pourrait fracasser TOUS LES RECORDS - où est le réchauffement climatique ? »

Dans ce tweet, Donald Trump confond un phénomène météorologique et des variations climatiques. En effet, les variations du climat se déterminent en faisant la moyenne des variations des paramètres sur 30 ans, ce qui peut inclure des périodes exceptionnelles avec des températures plus élevées ou plus faibles que ce qui est habituellement observé. Le phénomène auquel fait référence ce tweet ne concerne qu'une durée de quelques jours. Donald Trump utilise donc un cas particulier local pour remettre en cause un phénomène global et identifié depuis plusieurs dizaines d'années.

Question numérique : Un effet amplificateur du réchauffement climatique actuel est :

b. la fonte des glaces continentales.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 47)

8. Les dates de la moisson

Compétence principalement travaillée : Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps

Correction :

1. En 35 ans, la date moyenne des récoltes du blé d'hiver a été avancée de 20 jours. Ceci est en corrélation avec les données du document 2 qui montre sur la même période une diminution du nombre de jours de gel de presque 50 % (61 jours par an en 2008 contre 110 jours par an en 1968). Cette baisse du nombre de jours de gel peut être liée au réchauffement climatique avec des hivers plus doux depuis 1968. L'avancée de la date des récoltes peut s'expliquer soit par un meilleur ensoleillement, soit par des températures estivales plus élevées qui favorisent la maturation des fruits.

2. Pour tester l'hypothèse d'un effet de la température sur la date des récoltes, il faudrait faire des cultures dans des pièces ou dans de petites serres dans lesquelles la température pourrait être imposée. En faisant des cultures différentes avec pour seul facteur variant la température (par exemple une différence de 1 °C entre chaque culture, entre 20 et 40 °C) avec un éclairage équivalent et un apport d'eau identique, on pourrait voir si la hausse de température accélère la maturation des grains de blé. Pour tester l'ensoleillement, il faudrait fixer la température et faire varier l'intensité de l'éclairage entre les cultures.

Suggestion de questions supplémentaires :

3. **Citer un autre exemple de culture qui illustre les mêmes effets du réchauffement climatique.**
La culture du raisin présente des résultats similaires avec des vendanges de plus en plus précoces depuis quelques dizaines d'années.

4. **Expliquer pourquoi il est important de suivre la date des récoltes sur près de 30 ans.**
Regarder sur une longue période de 30 ans permet d'identifier des changements climatiques et non des effets météorologiques exceptionnels qui auraient pu modifier dans un sens ou dans l'autre la date de la moisson. Par exemple, si la date des récoltes avait été comparée entre 1970 et 1978, les résultats pourraient suggérer un refroidissement climatique puisque la date de la moisson est plus tardive. Observer la tendance sur une longue période permet donc de s'affranchir d'événements exceptionnels qui peuvent se produire sur la période.

Sources/Bibliographie :

- Benoît M et coll. *Revue de l'association Française d'Agronomie vol 5* (2015) : https://agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/revue-aes-vol5-n1-juin-2015-changement-climatique-et-agriculture-comprendre-et-anticiper-ici-et-ailleurs/revue-aes-vol5-n1-8/

Ressources pour aller plus loin :

- Un rapport illustré pour adapter l'agriculture aux changements climatiques : http://www.fao.org/3/a-i6398f.pdf
- Rebulard S. *Le défi alimentaire*, Belin (2018) : un ouvrage pour comprendre les enjeux de l'alimentation de demain dans un monde confronté aux changements climatiques notamment.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

9. Océan et réchauffement climatique

Compétence principalement travaillée : Identifier les relations de causalité qui sous-tendent la dynamique d'un système

Correction :

1. Le pH actuel des océans est entre 8 et 8,1 d'après le document 1. D'après le document 2, le carbone se retrouve donc principalement sous la forme d'ions hydrogénocarbonate HCO_3^- à ce pH.

2. Le document 1 prévoit une acidification des océans en parallèle à la hausse de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cette acidification se traduit par une diminution en proportion des ions hydrogénocarbonate au profit de dioxyde de carbone dissous dans les océans. Le réchauffement climatique risque donc d'acidifier les océans et de modifier leur composition chimique.

Sources/Bibliographie :

- Rapport 2018 du GIEC : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Luchetti A. *Modélisation et conception d'un système de culture de microalgues*, thèse de 2014 : http://www.theses.fr/2014ENMP0048

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Identifier les relations de causalités qui sous-tendent la dynamique d'un système

1. Doc. 1 et 2. Expliquer un rôle de l'océan sur le réchauffement climatique.
Le document 1 montre qu'une hausse de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone se traduit par une acidification des océans. Or, d'après le document 2, le dioxyde de carbone est un acide qui permet la formation d'ions hydrogénocarbonate. Il y a donc une dissolution d'une partie du dioxyde de carbone atmosphérique dans les océans, ce qui ralentit l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère. Ainsi, l'océan a un rôle amortisseur (rétroaction négative) sur le réchauffement climatique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 48-49)

10. La géo-ingénierie pour lutter contre le réchauffement climatique

Compétence principalement travaillée : Analyser la variation au cours du temps de certaines grandeurs

Correction :

1. En juin 1991, le Pinatubo est entré en éruption, libérant des particules et des gaz dans l'atmosphère comme le dioxyde de soufre. Le document 1 montre qu'il y a eu une baisse d'environ 6 W/m² juste après l'éruption et que les valeurs sont restées inférieures à la moyenne pendant un an et demi. Comme il s'agit de la seule baisse sur la période 1985-1999, on peut penser que cette baisse est bien la conséquence de l'éruption volcanique.
Le document 3 montre une baisse des températures d'environ 0,4 °C après l'éruption sur la même période. Cependant, la baisse de température ayant commencé avant l'éruption, il ne s'agit pas d'une preuve irréfutable que l'éruption a entraîné un refroidissement global.
Le document 2 montre sur la même période une baisse de près de 10 % des précipitations en domaine continental, ce qui a entraîné une baisse équivalente des décharges continentales par les différents cours d'eau.
Quant au document 4, il montre que la baisse des températures et de l'ensoleillement sont les principales causes de la baisse des rendements agricoles après l'éruption du Pinatubo.
Ainsi, libérer du dioxyde de soufre dans l'atmosphère pourrait avoir les mêmes effets qu'une éruption volcanique violente comme celle du Pinatubo, avec un refroidissement temporaire, mais aussi une baisse de l'ensoleillement et des précipitations, ce qui entraînerait une diminution des rendements agricoles.

2. L'idée d'injecter du dioxyde de soufre dans l'atmosphère a été envisagée par certains scientifiques comme un moyen de lutter contre le réchauffement climatique en étudiant les effets de certaines éruptions volcaniques comme celles du Pinatubo. En mimant certaines activités naturelles, certains scientifiques pensent contrer des effets liés aux activités humaines.

Sources/Bibliographie :

- Trenberth Ke et al., « *Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering* », *Geophysical Research Letters, vol 34* (2007) : http://www.cgd.ucar.edu/cas/adai/papers/TrenberthDai_GRL07.pdf.
- Hansen J. et al., « *A pinatubo climate modeling investigation* », *NATO ASI Series vol. I 42*, pp.233-272 (1997) : https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/hansen_02/.
- Proctor J et al., « *Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions* », *Nature 560*, pp.480-483 (2018) : https://www.nature.com/articles/s41586-018-0417-3

Ressources pour aller plus loin :

- Un article de veille scientifique de l'Ambassade de France aux États-Unis sur la montée en puissance de la géo-inégnierie dans ce pays : https://www.france-science.org/Face-au-changement-climatique-la.html
- M-A. Sicre et al., « Effet des éruptions volcaniques sur le climat », *Le climat à découvert*, CNRS éditions, p. 201-203 (2011) : un très bon chapitre de synthèse sur les conséquences des éruptions sur le climat, disponible en ligne : https://books.openedition.org/editionscnrs/11468?lang=fr

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

11. Permafrost et climat

Compétence principalement travaillée : Identifier les relations de causalité qui sous-tendent la dynamique d'un système

Correction :

1. D'après les données, la quantité de carbone présente dans le permafrost vaut :

m_C = richesse moyenne en carbone × surface totale du permafrost

$$m_C = 80 \times 10^6 \times 25 \times 10^6$$
$$m_C = 2 \times 10^{15}\,\text{kg} = 2 \times 10^{18}\,\text{g}$$

D'après le document 2, chaque atome de carbone peut donner une molécule de dioxyde de carbone sous l'action des microorganismes. Si on note n_{CO_2} la quantité (en mole) de dioxyde de carbone et M_{CO_2} la masse molaire du dioxyde de carbone, la masse de dioxyde de carbone pouvant être produite vaut donc :

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} \times M_{CO_2} = \frac{m_C}{M_C} \times M_{CO_2}$$
$$\text{m}_{CO_2} = \frac{2 \times 10^{18}}{12} \times (12 + 16 \times 2)$$
$$\text{m}_{CO_2} = 7,3 \times 10^{18}\ \text{g} = 7\ 300\ \text{Gt}$$ car une tonne = 10^3 kg = 10^6 g, donc 1 Gt = 10^{15} g.

Cette quantité est plus de trois fois supérieure à tout le dioxyde de carbone présent actuellement dans l'atmosphère !

2. Le document 1 montre que la température des permafrosts augmente quelle que soit la zone étudiée. Si le permafrost fond, la matière organique contenue sera consommée par les microorganismes du sol qui libèreront du dioxyde de carbone et du méthane, ce qui augmentera la quantité de gaz à effet de serre et augmentera la fonte du permafrost. Cette rétroaction positive aura pour effet de tripler la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, entraînant une élévation de la température moyenne à la surface de la Terre. Ainsi, même en arrêtant d'émettre des gaz à effet de serre, la fonte du permafrost pourrait contribuer à en libérer de grandes quantités dans l'atmosphère.

Sources/Bibliographie :

- Conférence d'automne de l'Union Américaine de Géophysique de 2017, consacrée aux effets du réchauffement climatique en Arctique : https://fallmeeting.agu.org/2017/files/2017/12/ArcticReportCard_full_report2017.pdf
- Turetsky MR et al., « *Permafrost collapse is accelerating carbon release* », *Nature 569*, p. 32-34 (2019) : https://www.nature.com/articles/d41586-019-01313-4

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Identifier les relations de causalité qui sous-tendent la dynamique d'un système

1. Indiquer les conséquences pour le climat de la fonte du permafrost. Inclure dans les explications un calcul donnant l'ordre de grandeur des échanges entre les réservoirs de carbone concernés.

Le document 1 montre que la température des permafrosts augmente quelle que soit la zone étudiée. Si le permafrost fond, la matière organique contenue sera consommée par les microorganismes du sol qui libèreront du dioxyde de carbone et du méthane, ce qui augmentera la quantité de gaz à effet de serre et la fonte du permafrost. Il est possible d'estimer cette hausse en prenant une quantité moyenne de carbone de 90 kg de $C \cdot m^{-2}$

m_C = richesse moyenne en carbone × surface totale du permafrost

$$m_C = 90 \times 10^6 \times 25 \times 10^6$$
$$m_C = 2\,250 \times 10^{15}\,\text{kg} = 2,25 \times 10^{18}\,\text{g}$$

D'après le document 2, chaque atome de carbone peut donner une molécule de dioxyde de carbone sous l'action des microorganismes. Si on note n_{CO_2} la quantité (en mole) de dioxyde de carbone et M_{CO_2} la masse molaire du dioxyde de carbone, la masse de dioxyde de carbone pouvant être produite vaut donc :

$$m_{CO_2} = n_{CO_2} \times M_{CO_2} = \frac{m_C}{M_C} \times M_{CO_2}$$
$$\text{m}_{CO_2} = \frac{2,25 \times 10^{18}}{12} \times (12 + 16 \times 2)$$
$$\text{m}_{CO_2} = 8,25 \times 10^{18}\ \text{g} = 8\ 250\ \text{Gt}$$ car une tonne = 10^3 kg = 10^6 g, donc 1 Gt = 10^{15} g .

Cette quantité est plus de trois fois supérieure à tout le dioxyde de carbone présent actuellement dans l'atmosphère !

Cette rétroaction positive aura pour effet de tripler la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et entraînera ainsi une élévation de la température moyenne à la surface de la Terre. Ainsi, même en arrêtant d'émettre des gaz à effet de serre, la fonte du permafrost pourrait contribuer à en libérer de grandes quantités dans l'atmosphère.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le coin des experts (p. 50)

12. Variation passée du niveau marin

Compétence principalement travaillée : Estimer la variation du volume de l'océan associée à une variation de température donnée

Correction :

1. Les variations du niveau marin peuvent résulter soit de la prise en glace ou de la fonte des glaciers, ou bien d'un effet de contraction ou de dilatation thermique.

2. Sachant que la température a varié de 6 °C, en considérant le coefficient de dilatation thermique et le fait que cela n'affecte que les mille premiers mètres, la variation de hauteur du niveau marin H correspond donc à : $\mathrm{H} = 6 \times 2,6 \times 10^{-4} \times 1\ 000 = 1,56\ \mathrm{m}$
Ceci est bien inférieur aux 130 m de variations observées sur le document 1. La dilatation thermique de l'eau n'explique donc pas l'essentiel de la hausse du niveau marin depuis la dernière glaciation.

3. Compte tenu de la réponse à la question précédente, l'eau à l'origine de la hausse du niveau marin provient de la fonte des glaces. Il faut donc calculer ce volume en calculant le volume de la Terre dans cette tranche de 128 m environ (Car 130 - 1,56m) et en prendre 70 % pour avoir le volume d'eau piégée.

$$V_{eau} = \frac{4}{3} \times \pi \times (6\,371^3 - 6\,370,872^3) \times \frac{70}{100}$$

$V_{eau} = 45\ 677\ 690,10\ \mathrm{km}^3$ soit 45,6 millions de km3 environ.

Sources/Bibliographie :

- M. Renard et coll., *Eléments de géologie*, 16° édition (2018)

13. Variation du dioxyde de carbone à l'échelle des temps géologiques

Compétence principalement travaillée : Analyser les variations au cours du temps de certaines grandeurs

Correction :

Depuis 600 millions d'années, il y a d'abord eu, entre -600 et -450 millions d'années, une augmentation de la concentration atmosphérique, puis une première baisse entre -450 et -280 millions d'années. Il y a eu une hausse de la teneur atmosphérique entre -250 et -220 millions d'années, puis il y a une diminution régulière de la quantité atmosphérique du dioxyde de carbone jusqu'à nos jours.

Le dioxyde de carbone étant un gaz à effet de serre, on peut donc associer à ces variations des variations de températures. Ainsi, à l'échelle des temps géologiques, le climat a été plus chaud sur Terre au cours des 600 derniers millions d'années, sauf vers -300 millions d'années qui devait correspondre à une période glaciaire. Chaque hausse de la teneur en dioxyde de carbone traduit un réchauffement climatique, chaque baisse traduit un refroidissement climatique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Les variations de la teneur en dioxyde de carbone peuvent s'expliquer par des réactions chimiques, les atomes de carbone ne pouvant provenir que d'autres molécules ou se retrouver incorporées dans d'autres molécules. La première baisse est corrélée d'abord à l'apparition des premières plantes terrestres puis à la Pangée, un super continent à l'origine de nombreux reliefs. Or, les végétaux terrestres réalisent la photosynthèse, donc leur prolifération devrait s'accompagner d'une diminution de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique. Par ailleurs, l'altération des minéraux des roches, comme cela est présenté dans le document 2, consomme du dioxyde de carbone qui aurait ainsi pompé le dioxyde de carbone de l'atmosphère, entraînant la formation de calcaire $CaCO_3$. Ce carbone se retrouve ensuite dans les océans sous la forme d'ions hydrogénocarbonates suite à la dissolution du calcaire.

La respiration cellulaire contribue à réémettre du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Peut-être que la prolifération d'êtres vivants après la Pangée (qui survient au moment d'une crise biologique) peut expliquer cette remontée de la teneur en dioxygène atmosphérique.

Sources/Bibliographie :

- L'article de Pierre Thomas sur les variations des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone depuis la formation de la Terre : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/co2-depuis-4ga.xml

Ressources pour aller plus loin :

- La conférence de Pierre Thomas sur les changements climatiques : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/variation-climat-fdls2015.xml

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Analyser les variations au cours du temps de certaines grandeurs

1. **Doc. 1. La période actuelle est une période froide à l'échelle des temps géologiques avec la présence de glaciers. Identifier une autre période glaciaire.**
Si le climat est directement lié à la concentration atmosphérique en dioxyde, alors une valeur faible doit correspondre à une période glaciaire qui semble survenir aux alentours des 300 millions d'années, suite à la formation de la Pangée, un supercontinent.

2. **Les glaciers sont de puissants agents d'érosion. Formuler des hypothèses aux différentes baisses de la teneur atmosphériques en dioxyde de carbone depuis 600 millions d'années.**
Suite à une période glaciaire, l'érosion devient élevée. Or, le document 2 montre que les minéraux des roches qui sont altérées consomment du dioxyde de carbone. Ainsi, certaines des baisses de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère doivent correspondre à l'érosion des chaînes de montagnes avec l'altération des minéraux et la formation de calcaires ou roches carbonatées.

3. **Indiquer si le climat terrestre sur les derniers 600 millions d'années a globalement été plus chaud ou plus froid qu'actuellement. Justifier votre réponse.**
Sur les 600 derniers millions d'années, la concentration en dioxyde de carbone a toujours été supérieure aux concentrations actuelles et jusqu'à vingt fois plus élevée. Comme il s'agit d'un gaz à effet de serre, le climat a été globalement plus chaud depuis les 600 derniers millions d'années.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

4. Préciser où se trouve actuellement le carbone qui était autrefois dans l'atmosphère.
D'après le document 2, l'altération des minéraux permet la formation de calcaire, qui est un des réservoirs contenant le dioxyde de carbone qui était auparavant atmosphérique. Un autre réservoir de carbone correspond à l'ensemble des êtres vivants, notamment suite à la photosynthèse qui transforme le dioxyde de carbone en matière organique. Enfin, l'essentiel du dioxyde de carbone libéré actuellement par les activités humaines provient des combustibles fossiles (charbon et pétrole) qui sont issus de la fossilisation de matière organique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 3 : Le climat du futur

Présentation **2**

Activités **5**
Activité documentaire 1 : La modélisation du climat (p. 52-53) 5
Activité de groupe 2 : L'impact des activités humaines sur le climat futur (p. 54-55) 9
Groupe 1 : Les émissions de dioxyde de carbone 9
Groupe 2 : Les émissions de méthane 11
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 12
Activité de groupe 3 : Le climat futur et ses conséquences (p. 56-59) 14
Groupe 1 : Des impacts sur les territoires 15
Groupe 2 : Des impacts au niveau des mers et des océans 15
Groupe 3 : Des impacts sur la biodiversité et les écosystèmes 16
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 17

Bilan (p. 61) **24**

Exercices **25**
Zone d'échauffement (p. 62) 25
L'atelier des apprentis (p. 63) 25
Le repaire des initiés (p. 64) 29
Le coin des experts (p. 65-66) 32

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Ce chapitre explicite la manière dont la communauté scientifique modélise le climat du futur. Il permet également de comprendre quelles sont les causes anthropiques à l'origine du réchauffement climatique (agriculture, déforestation, production de ciment, etc.). Il met en avant les conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité, l'élévation du niveau de la mer, la prolifération d'espèces invasives. Ce chapitre permet ainsi aux élèves de prendre conscience de l'impact des humains sur le climat du futur.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Les échelles de la biodiversité : définitions, notions d'espèce, variabilité génétique ;
- La biodiversité au cours du temps : la notion de crise biologique ;
- Érosion et activités humaines : impact humain sur l'érosion des paysages ;
- Structure et fonctionnement des agrosystèmes : besoins agricoles humains, pratiques agricoles (agriculture intensive, utilisation d'intrants, etc.) ;
- Vers une gestion durable des agrosystèmes : enjeux environnementaux, limitation ou compensation des impacts environnementaux.

Ces notions permettent de mieux comprendre les enjeux environnementaux liés au réchauffement climatique, engendré de manière directe ou indirecte par l'activité humaine.

Ce qui a été enseigné en première :

- En Enseignement scientifique :
  - Le Soleil notre source d'énergie (LLS.fr/ES1P66) : distinction entre météorologie/climat, notion d'albédo, mention du réchauffement climatique lié au renforcement de l'effet de serre.
  - Cette partie du programme prépare les notions essentielles nécessaires à la compréhension de l'établissement des modèles climatiques.
- En première spécialité SVT :
  - Les écosystèmes : des interactions dynamiques entre les êtres vivants et avec leur milieu. Notions de biocénose et de biotope, fonctionnement d'un écosystème, perturbations des écosystèmes.
  - L'humanité et les écosystèmes : les services écosystémiques et leur gestion. L'espèce humaine affecte le fonctionnement de la plupart des écosystèmes en exploitant des ressources (ex. : forestières), en modifiant le biotope local ou global (changement climatique, introduction d'espèces invasives).

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

- Les chapitres 1 et 2, sur l'atmosphère terrestre et la complexité du système climatique, expliquent la composition et l'évolution de l'atmosphère au cours du temps. Ils définissent également les différents acteurs du système climatique et leurs interactions.
- Produire de l'électricité sans contribuer au réchauffement climatique, optimiser son transport deviennent des objectifs d'une transition climatique et environnementale. Les chapitres suivants, sur l'énergie et le futur climatique, expliquent comment les humains peuvent, par leurs choix, réduire ou limiter le réchauffement climatique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Bibliographie :

A. Foucault, *Climatologie et paléontologie*, 2016.
J. Jouzel et al., *Quel climat pour demain ? 15 questions réponses pour ne pas finir sous l'eau,* 2015
« *Océans, le dernier continent à explorer* », Hors-série, *Pour la Science,* n° 104, Août-Septembre 2019

Sitographie :

- Vidéo de 5 min expliquant comment se construit un modèle climatique : https://www.ipsl.fr/fr/Mediatheque/Multimedia/Animation-sur-la-modelisation-climatique
- Site permettant de montrer l'évolution du niveau de la mer : http://flood.firetree.net/
- Site géorisques permettant de visualiser les risques près de chez vous : http://www.georisques.gouv.fr/
- Vidéo avec protocoles pour montrer l'évolution du pH en fonction de la concentration en CO_2 (expériences colorimétriques ou sonde pH) :
  - https://www.youtube.com/watch?time_continue=99&v=epDWuf-J9p0
  - http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1354
- Vidéo avec évolution d'un ptéropode dans un milieu acide et dans un milieu témoin : https://www.youtube.com/watch?v=6H_VDhXiFk4&feature=youtu.be
- Vidéo sur l'évolution du moustique tigre : https://www.youtube.com/watch?v=JatLzYTp23o
- Liens vers différents logiciels de modélisation climatique : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/paleobiomes/illustrer/logiciels-de-modelisation-climatique-en-ligne-ou-a-telecharger
- Météo France prête gratuitement des expositions : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_plaquette_presentation_expositions.pdf
- Logiciels de modélisation :
  - Météo France Climat HD : http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd
  - Drias : http://www.drias-climat.fr/decouverte
  - Simclimat : http://education.meteofrance.fr/lycee/animations/utiliser-les-animations-en-classe/fiche-pedagogique-simclimat-un-modele-simple-de-bilan-radiatif-de-la-terre#
- NOAA donne des indications de températures (rapport du mois de juin 2019) : https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-201906
- Vidéo sur la production du ciment : https://www.usinenouvelle.com/article/la-composition-des-ciments-clef-de-la-reduction-des-emissions-de-co2.N770714
- Vidéo Météo France présentant les risques du climat futur : https://www.youtube.com/watch?v=vwWbWwhbNak
- Historique des tempêtes en France métropolitaine par Météo France : http://tempetes.meteofrance.fr/spip.php?rubrique6&fbclid=IwAR3HlqOUf2uIJw4H7nreUMvdjRcBRfEyKXg4kwD5Pm1fw29P4mlf1aG3oyE
- Site Propluvia qui donne des cartes de restriction des eaux en France : http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp
- Vidéos sur l'acidification des océans :
  - https://education.francetv.fr/matiere/developpement-durable/cinquieme/video/l-acidification-des-oceans
  - https://fr.oceancampus.eu/cours/Ajw/acidification-des-oceans

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Vidéo France info sur le rapport de l'IPBES : https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/biodiversite/video-le-rapport-alarmant-de-l-ipbes-la-biodiversite-se-meurt-nos-modes-de-vie-sont-en-sursis_3431015.html
- Site WWF pour observer l'évolution de certaines espèces en fonction des différents scénarios du GIEC : https://www.wwf.fr/nature-climat
- Rapport 2018 du GIEC à destination des enseignants : http://www.oce.global/sites/default/files/2019-04/1.5degree_FR_final_LR.pdf
- Différentes ressources de la NASA (graphique sur la concentration en CO_2 atmosphérique, niveau de la mer, glace antarctique, signaux vitaux de la Terre, images avant/après) :
    - https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?fbclid=IwAR0f1U8hKwpe9S-ugxRlvkVyI7EbE-hOKdO1VV4PFFHmGsuv5S3Dm3oFS9k
    - https://sealevel.nasa.gov/vesl/web/sea-level/slr-antarctica/
    - https://climate.nasa.gov/earth-now/?vs_name=air_temperature&dataset_id=820&group_id=46&animating=f&start=&end=
    - https://climate.nasa.gov/interactives/climate-time-machine
    - https://climate.nasa.gov/images-of-change?id=684#684-vavilov-ice-cap-glacier-accelerates
- Vidéo *Le Monde* sur les conséquences du réchauffement climatique : https://www.lemonde.fr/planete/video/2014/09/23/comprendre-le-rechauffement-climatique-en-4-minutes_4492721_3244.html
- Vidéo conférence sur les modèles climatiques : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/simulation-des-conferences-des-parties-sur-le-changement-climatique/ressources-pedagogiques-et-questions-philosophiques/cop-21-des-ressources-scientifiques-et-des-actualites
- Questions réponses pour combattre le climatoscepticisme : https://leclimatchange.fr/questions-reponses/
- Des informations supplémentaires sur les supercalculateurs : https://lejournal.cnrs.fr/supercalculateur

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- La fresque du climat : https://fresqueduclimat.org/

Document sous licence libre Creative Commons

Activités

Dans ce chapitre, on cherche à expliquer, dans un premier temps, comment sont établis les modèles climatiques : utilisation de données scientifiques solides, utilisation de lois de la physique fondamentale, confrontation des modèles avec les observations du réel, etc. Il s'agit ensuite, dans un deuxième temps, d'expliquer l'impact des activités humaines sur le climat du futur et les conséquences sur la biodiversité, le niveau de la mer, l'acidification des océans, etc. L'objectif est de faire prendre conscience aux élèves de l'importance de l'étude du climat et de l'impact des activités humaines sur ce dernier.

Activité documentaire 1 : La modélisation du climat (p. 52-53)

L'objectif de cette activité est de comprendre comment sont établis, validés et utilisés les modèle climatique.

Lien avec le programme : Cette activité traite les premiers items de la partie 1.3 sur Le climat du futur.

Objectifs notionnels :

- Les modèles climatiques s'appuient sur :
  - la mise en équation des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ;
  - des méthodes numériques de résolution.

  Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations *in situ* et spatiales, ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats.
  Ces modèles, nombreux et indépendants, réalisent des projections climatiques. Après avoir anticipé les évolutions des dernières décennies, ils estiment les variations climatiques globales et locales à venir sur des décennies ou des siècles.

Objectifs méthodologiques :

- Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique, en exploitant un logiciel de simulation de celle-ci, ou par la lecture de graphiques.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Construction d'un modèle climatique
Ce document montre le chemin permettant à la communauté scientifique d'établir un modèle climatique fiable. Les modèles prennent en compte différentes données (exemple : observation *in situ*). Ils sont soumis à des lois fondamentales, à la numérisation des données et au codage de ces informations dans des supercalculateurs, et peuvent être corrigés en comparaison avec des observations. Il existe différents modèles climatiques indépendants qui peuvent être utilisés à différentes échelles de temps et d'espace.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 2 : Valider un modèle climatique en le confrontant à des observations connues récentes
Ces deux cartes montrent la variation de l'amplitude thermique du cycle saisonnier de la température de l'air de surface, obtenue grâce au modèle IPSL-CM4, et des données observées. Ce document met en évidence que les modèles sont très similaires aux données observées, ce qui renforce leurs capacités de prédictibilité.

Document 3 : SimClimat : un logiciel pour simuler le climat futur
Ce document met en avant un outil de simulation très simplifié mis à disposition par Météo France et utilisable gratuitement par les élèves. Cette simulation permet aux élèves de mieux appréhender la complexité d'un modèle climatique mais également de comprendre l'évolution climatique en fonction de différents paramètres (augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique, etc.)

Réponses attendues aux questions :

1. La mise en équation permet de transcrire dans un langage mathématique des problématiques liées à l'étude du climat. Cela facilite la mise en relation des données dans des équations et permet de solutionner un problème à multiples paramètres. La multiplicité des équations et des paramètres rend la résolution trop complexe et nécessite l'utilisation de l'informatique pour la construction des modèles climatiques.

2. La construction d'un modèle climatique est un processus qui mobilise de nombreux acteurs comme :

- des physiciens et de chimistes (utilisation des lois de la thermodynamique, mécanique des fluides) ;
- des biologistes ;
- des géologues (étude de la géodésie, étude des données spatiales, paléo-climatiques) ;
- de mathématiciens (mise en équation) ;
- des informaticiens (numérisation des données, codage, etc.) ;
- des climatologues (étude des climats passés, présents et futurs).

L'établissement d'un modèle est long, car il prend en compte une multitude de phénomènes mobilisés par de nombreux acteurs.

3. Les résultats d'un modèle sont comparés à des observations directes dans l'objectif d'être validés ou bien d'être améliorés. Ils peuvent être testés sur des climats passés des dernières décennies.
En comparant les données du document 2, on voit que le modèle peut alors être corrigé localement afin de mieux correspondre à la réalité observée et de mieux estimer les variations futures.

4. On observe une grande similitude entre les résultats du modèle et les observations : cela signifie qu'il s'agit d'un modèle pertinent. On observe quelques différences, par exemple en Australie où la température simulée est plus importante que la température observée. Ces

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

différences restent cependant négligeables et on constate que le modèle est très similaire aux observations : il ne nécessite que très peu de corrections.

5. Au XXe siècle, les modèles climatiques comportaient des erreurs qui nécessitaient d'être corrigées, mais aujourd'hui les modèles sont beaucoup plus performants, ce qui permet de faire peu ou pas de corrections.

6. La construction d'un modèle climatique est complexe, car elle implique :

- de nombreuses données (physiques, chimiques, biologiques, mathématiques) ;
- de nombreux acteurs (physiciens, mathématiciens, etc.) ;
- de nombreux supercalculateurs puissants ;
- l'utilisation de différents échelles spatio-temporelles ;
- la validation du modèle climatique en comparant le modèle avec des observations directes ou des climats passés.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Protocoles et résultats expérimentaux :

Réaliser une modélisation avec le logiciel SimClimat

Matériel nécessaire :

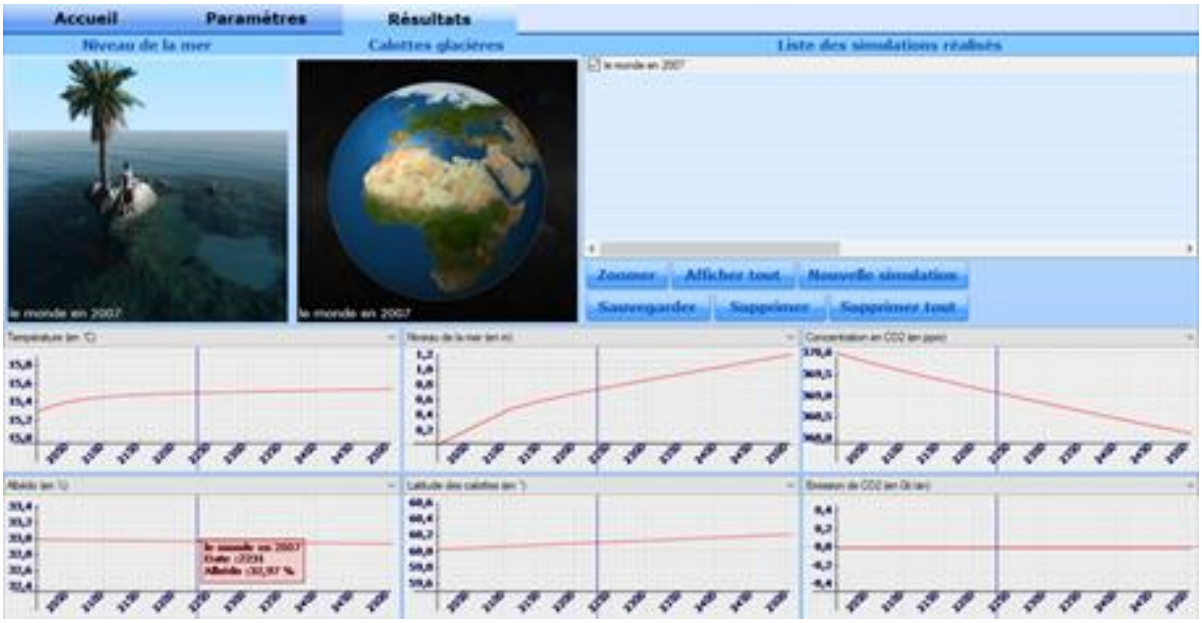
- Logiciel SimClimat

Protocole :

- Choisir « à partir de 2007 » durant « 100 ans ».
- Donner un nom à cette simulation.
- Choisir dans « Concentration ou émissions de CO_2 ».
- Émissions anthropiques (en Gt/an), choisir « nulles » ou « comme aujourd'hui » ou « deux fois plus qu'aujourd'hui » ou « autre (à fixer manuellement) ».
- Lancer la simulation.

NB : il est possible de lancer plusieurs simulations qui vont se superposer, d'où l'importance de nommer les simulations.

Résultats attendus :



Ressources complémentaires :

- Logiciels de modélisation :
  - Météo France Climat HD : http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd
  - Drias : http://www.drias-climat.fr/decouverte
  - SimClimat : http://education.meteofrance.fr/lycee/animations/utiliser-les-animations-en-classe/fiche-pedagogique-simclimat-un-modele-simple-de-bilan-radiatif-de-la-terre#
- Liens vers des conférences sur la modélisation climatique : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/simulation-des-conferences-des-parties-sur-le-changement-climatique/ressources-pedagogiques-et-questions-philosophiques/cop-21-des-ressources-scientifiques-et-des-actualites

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité de groupe 2 : L'impact des activités humaines sur le climat futur (p. 54-55)

L'objectif de cette activité est de faire travailler les élèves en groupe sur deux gaz à effet de serre et sur leur origine anthropique. Une différenciation est possible entre les deux groupes avec des notions plutôt liées à la physique-chimie dans l'un et des notions plutôt liées aux SVT dans l'autre.

Lien avec le programme :
Cette activité traite les items de la partie 1.3 sur Le climat du futur relatifs aux impacts des activités humaines sur le climat.

Objectifs notionnels :

- L'analyse scientifique combinant observations, éléments théoriques et modélisations numériques permet aujourd'hui de conclure que l'augmentation de température moyenne depuis le début de l'ère industrielle est liée à l'activité humaine : CO_2 produit par la combustion d'hydrocarbures, la déforestation, la production de ciment, CH_4 produit par les fuites de gaz naturel, la fermentation dans les décharges, certaines activités agricoles.

Objectifs méthodologiques :

- Étudier des documents variés (graphique, textes, etc.).
- Comprendre qu'un effet peut avoir plusieurs causes.

Durée estimée : 40 minutes.

Groupe 1 : Les émissions de dioxyde de carbone

Présentation des documents

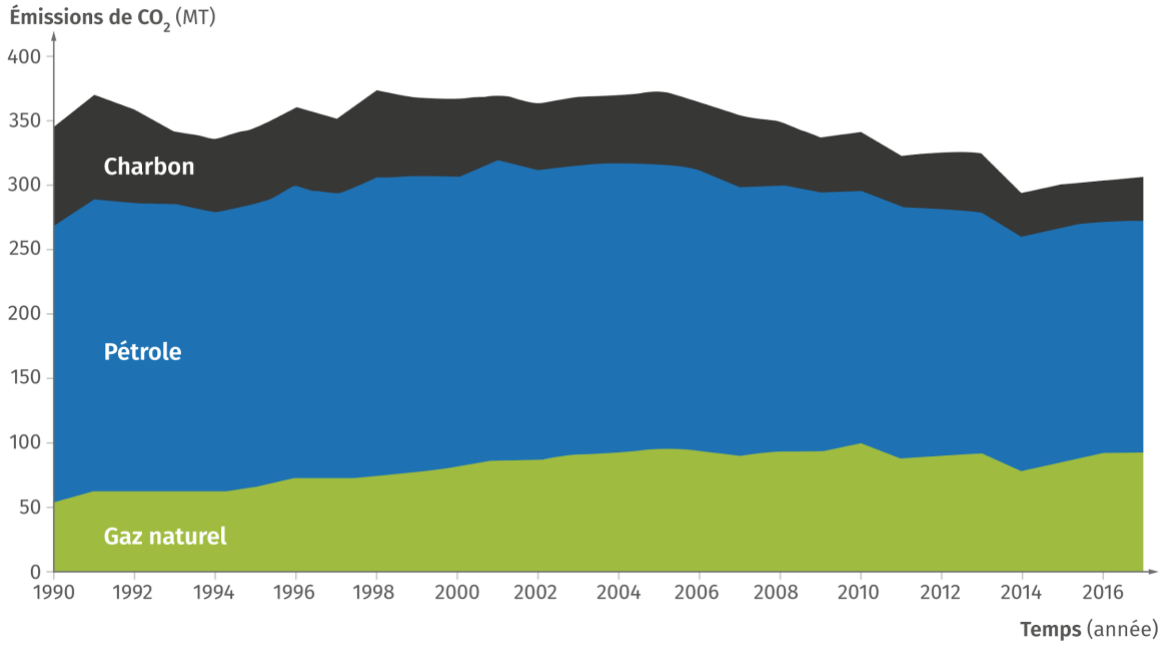
Document 1 : Combustibles fossiles, fabrication de ciment et émissions de CO_2
Ce document explique deux provenances des émissions de dioxyde de carbone : la production du ciment et les usines à charbon.

Document 2 : Déforestation et production de CO_2
Ce texte accompagné d'une infographie explique comment les forêts peuvent être des puits de carbone, mais peuvent également engendrer lors de la déforestation une libération du carbone stocké sous la forme de dioxyde de carbone.

Document sous licence libre Creative Commons

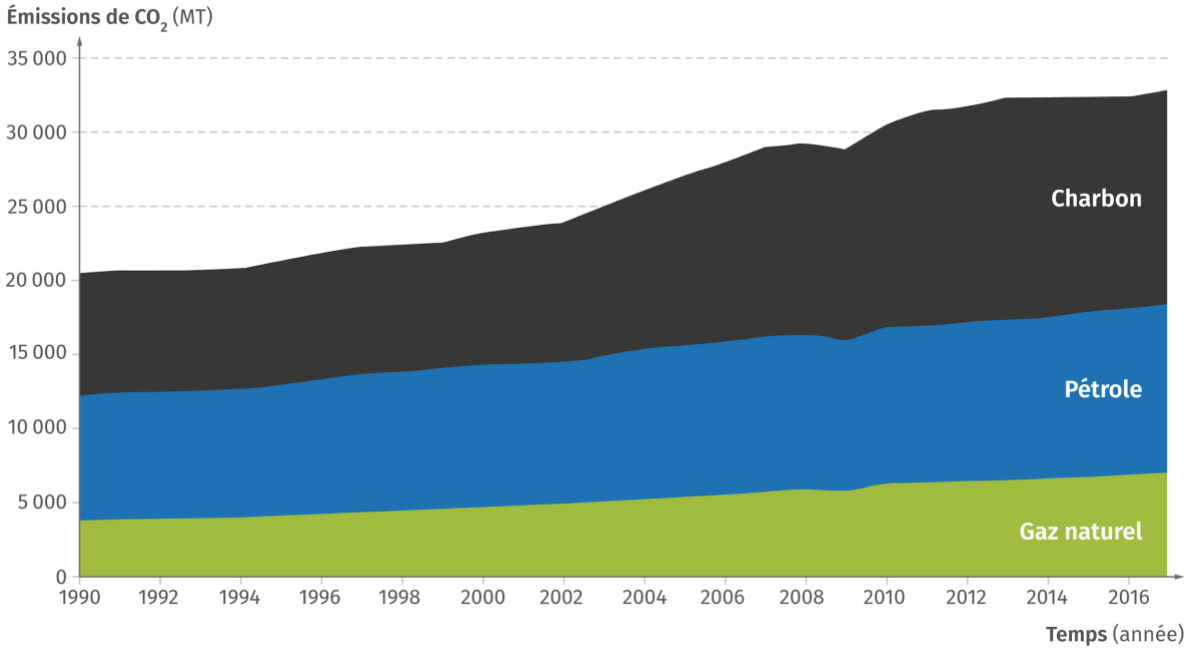
Ressources complémentaires :

Émissions de CO_2 pour différentes sources d'énergie en France entre 1990 et 2017



Source : https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20energy%20source

Émissions de CO_2 pour différentes sources d'énergie dans le monde entre 1990 et 2017



Source : https://www.iea.org/data-and-statistics?country=FRANCE&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2%20emissions%20by%20energy%20source

Document sous licence libre Creative Commons

- Vidéo montrant la combustion du carbone (expérience) **:** https://www.youtube.com/watch?v=UsbbaL-xRq8
- Vidéo *Le Monde* « Pourquoi l'Amazonie brûle et pourquoi c'est grave ? » : https://www.youtube.com/watch?v=y1QXDmZkJcU
- Dossier WWF sur la déforestation : https://www.wwf.fr/sites/default/files/doc-2018-11/20181107_Rapport_Synthe%CC%80se_De%CC%81forestation_Importe%CC%81e_France_WWF-min.pdf
- Article WWF sur la déforestation : https://www.wwf.fr/champs-daction/foret/approvisionnement-responsable/deforestation
- Carte montrant la déforestation en temps réel : https://www.notre-planete.info/environnement/deforestation.php
- Article sur le carbone contenu dans le ciment : http://www.construction-carbone.fr/lecimentetsapartcarbone/
- Vidéo sur le bilan carbone du ciment : https://www.actu-environnement.com/ae/news/Bilan-carbone-ciment-filiere-changer-33280.php4
- Schéma sur la fabrication du ciment par le CNRS : http://www.prc.cnrs.fr/spip.php?article92

Groupe 2 : Les émissions de méthane

Présentation des documents

Document 3 : Fuites de gaz naturel : l'exemple des États-Unis
Document texte expliquant une fuite de gaz de méthane sur le site d'Aliso Canyon.

Document 4 : Émissions dans les élevages
Plusieurs infographies montrant le pourcentage d'émissions de méthane pour chaque type d'élevage (bovins, ovins, porcs, etc.) et l'origine de la production du méthane par fermentation chez la vache.

Document 5 : Fermentation dans les décharges
Ce document donne des indications chiffrées sur les décharges en France et sur l'évolution de la composition volumique du biogaz.

Ressources complémentaires :
- Vidéo de *Sciences et avenir* sur la fuite de méthane à Aliso Canyon : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/tout-ce-qu-il-faut-savoir-sur-l-enorme-fuite-de-gaz-du-puits-d-aliso-canyon_17541
- Article de *Le Monde* sur la fuite de méthane à Aliso Canyon : https://www.lemonde.fr/planete/article/2016/01/07/etat-d-urgence-en-californie-apres-une-fuite-massive-de-methane_4842896_3244.html
- Brochure de l'ADEME sur la méthanisation en 10 questions : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-methanisation-en-10-questions.pdf

Document sous licence libre Creative Commons

- Article de *Libération* sur l'évolution de la consommation de bovins en France en 2018 : https://www.liberation.fr/france/2019/04/04/la-consommation-de-viande-a-re-augmente-en-2018-en-france_1719314

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Lors de la combustion du charbon dans les usines à charbon, il y a libération de CO_2 dans l'atmosphère liée à l'équation suivante : $CxHy + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$. La combustion du charbon permet une libération importante d'énergie pour l'industrie. L'utilisation de ce processus a pour conséquence une augmentation du CO_2 atmosphérique.
Pour fabriquer du ciment, il faut faire cuire de l'argile et du calcaire à environ 1 450 °C. Ce processus se nomme la clinkérisation. Le calcaire a pour formule $CaCO_3$ et l'élévation de la température provoque la décarbonatation de ce dernier selon la formule suivante :
$CaCO_3$ (calcaire) $\rightarrow CaO + CO_2$
La fabrication du ciment génère donc une augmentation du CO_2 atmosphérique. Cette augmentation peut être quantifiée en France grâce aux données fournies dans le document : 16 millions de tonnes × 656 kg de CO_2 = 10 496 000 tonnes de CO_2 libérées par an en France à cause de la production de ciment.

2. Les forêts constituent un équilibre entre capture et libération de CO_2. Lors de leur croissance, la photosynthèse permet la capture de CO_2 et elles constituent donc des puits de CO_2. Lors de la déforestation, il y a du défrichage et des feux de forêts, ce qui engendre une libération massive du carbone stocké dans la végétation et les sols. De plus, la déforestation est accompagnée le plus souvent d'une conversion des sols pour servir l'industrialisation ou l'agriculture qui sont des secteurs générateurs de CO_2 atmosphérique.
On pourrait penser que la reforestation peut constituer une solution, mais la capture et l'accumulation du carbone est plus lente.
La déforestation engendre une augmentation du CO_2 atmosphérique de manière directe avec la libération du stock de carbone dans la végétation et les sols, et de manière indirecte avec la réhabilitation des sols qui génère des émissions de gaz à effet de serre.

Groupe 2 :

1. Il existe différentes sources d'émissions de méthane :
   - les fuites de gaz naturel. C'est ce qui s'est passé dans l'exemple d'Aliso Canyon. Lors de l'exploitation de gaz naturel (utilisation pour le gaz de ville notamment), le gaz peut s'échapper par des fuites naturelles, ce qui engendre une augmentation de la concentration en méthane atmosphérique.
   - les élevages (notamment ceux de bovins). Chez la vache, par exemple, il y a un phénomène de fermentation lié à la vie microbienne (bactéries et champignons) dans le rumen. Cette fermentation, nécessaire à la digestion de l'animal, génère la libération de 70 à 120 kg de CH_4 (méthane) par jour. On peut quantifier la production de méthane

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

pour les élevages : 100 kg de CH_4 × 19 millions de bovins = 1 900 millions de kg de CH_4 par an, soit 1,9 millions de tonnes en France.

- les fermentations dans les décharges. Lors de la décomposition des déchets dans les décharges s'opère une fermentation, liée à la présence de microorganismes. La fermentation engendre la libération de gaz à effet de serre, comme le méthane qui est diffuse alors dans l'atmosphère.

2. Le méthane, tout comme le CO_2, est un gaz à effet de serre. L'augmentation de la teneur atmosphérique en méthane liée à l'agriculture, les fuites de gaz naturel ou encore la fermentation dans les décharges va amplifier l'effet de serre. L'amplification de l'effet de serre (qui est un phénomène naturel) est à l'origine du réchauffement climatique observé ces dernières années.

Document sous licence libre Creative Commons

Activité de groupe 3 : Le climat futur et ses conséquences (p. 56-59)

Le but de cette activité est de comprendre ce qu'est le GIEC et de visualiser les différents scénarios possibles en fonction des choix anthropiques. Cette activité contient une page commune, puis peut s'articuler en trois groupes : les impacts sur les territoires, les impacts au niveau des mers et des océans, et les impacts sur la biodiversité et les écosystèmes. L'objectif est de faire le lien entre les scénarios du GIEC et les conséquences sur la planète.

Lien avec le programme :
Les items restants de la partie 1.3 Le climat du futur sont traités dans cette activité.

Objectifs notionnels :
- Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES :
  - une augmentation de 1,5 à 5 °C de la température moyenne entre 2017 et la fin du XXIe siècle ;
  - une élévation du niveau moyen des océans entre le début du XXIe siècle et 2100, pouvant atteindre le mètre ;
  - des modifications des régimes de pluie et des événements climatiques extrêmes ;
  - une acidification des océans ;
  - un impact majeur sur les écosystèmes terrestres et marins.

Objectifs méthodologiques :
- Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :
- Étudier des cartes.
- Étudier des graphiques.
- Analyser des résultats d'expériences.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Rapports et scénarios du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
Ce document décrit la manière dont se constituent les rapports du GIEC et permet d'expliquer les différents scénarios établis. Chaque scénario mène à un réchauffement global en surface avec une augmentation comprise entre 1,5 et 2 °C (scénario optimiste) ou entre 4 et 5 °C (scénario pessimiste).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ressources complémentaires :

- La fresque du climat (activité à réaliser en 2 ou 3 h avec des vignettes, il suffit de s'inscrire gratuitement pour obtenir les différentes versions des vignettes) : https://fresqueduclimat.org/

Groupe 1 : Des impacts sur les territoires

Présentation des documents

Document 2 : L'élévation du niveau de la mer dans le département de la Manche
Trois cartes du département de la Manche illustrent différents scénarios du GIEC. On constate alors l'impact sur le territoire avec l'élévation du niveau marin.

Document 3 : Événements climatiques et météorologiques extrêmes et autres impacts sur le territoire français
Ce document représente une carte de la France métropolitaine et des DROM avec la hausse de température d'ici 2050, ainsi que les risques tels que les feux de forêts, les inondations, la sécheresse, etc.

Ressources complémentaires :

- Site internet permettant de voir l'évolution du niveau de la mer : http://flood.firetree.net/
- Site géorisques pour estimer les risques près de chez vous : http://www.georisques.gouv.fr/
- Vidéo de Météo France expliquant les risques liés au climat : https://www.youtube.com/watch?v=vwWbWwhbNak
- Le site Propluvia montrant les restrictions d'eau : http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp

Groupe 2 : Des impacts au niveau des mers et des océans

Présentation des documents

Document 4 : Réactions chimiques et acidification des océans
Cette infographie permet de comprendre l'origine de l'acidification des océans. Celle-ci provient de la solubilisation du CO_2 atmosphérique, qui suite à de nombreuses réactions va générer une augmentation d'ions H^+, acidifiant ainsi l'océan.

Document 5 : Évolution du pH des océans selon les scénarios du GIEC
Ce graphique montre l'évolution du pH des océans en fonction de deux scénarios du GIEC (le plus optimiste étant RCP 2.6 et le plus pessimiste étant RCP 8.5).

Document 6 : Impact de l'acidification des océans sur les êtres vivants
Ce document relate les résultats de deux expériences d'acidification du milieu sur deux êtres vivants (bars et *Thecosomata*) au cours du temps.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ressources complémentaires :

- Protocole du MNHN pour montrer l'acidification d'un milieu aqueux à l'aide d'un indicateur coloré (choux rouge) : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1354
- Vidéo de l'expédition *Tara Oceans* où des élèves utilisent une sonde pH pour mesurer l'acidité d'un milieu : https://www.youtube.com/watch?time_continue=99&v=epDWuf-J9p0
- Vidéo sur l'acidification des océans : https://fr.oceancampus.eu/cours/Ajw/acidification-des-oceans
- Commissariat général du développement durable, *Acidification des océans* (PDF) : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Acidification%20des%20oc%C3%A9ans.pdf
- Vidéos de Tara expéditions (expériences avec des élèves) : https://oceans.taraexpeditions.org/lesdessousdelocean/graines-de-reporters-scientifiques/enquete.html#acidification-des-oceans
- Vidéos de Sébastien Folin sur l'acidification des océans : https://education.francetv.fr/matiere/developpement-durable/cinquieme/video/l-acidification-des-oceans
- Cartes de l'évolution de l'acidité dans les océans : http://regardssurlaterre.com/cartes-et-donnees/lacidification-des-oceans-en-2000-2050-2099
- Infographies du Ministère de la Transition écologique et solidaire et site officiel : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/impacts-du-rechauffement-climatique-sur-biodiversite
- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/
- Vidéo de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) montrant l'évolution d'une coquille de *Thecosomata* dans un milieu acide : https://www.youtube.com/watch?v=6H_VDhXiFk4&feature=youtu.be
- Reportage de France TV sur l'IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) : https://www.francetvinfo.fr/meteo/climat/l-eau-des-oceans-plus-acide-sous-l-effet-du-rechauffement-climatique_3631999.html

Groupe 3 : Des impacts sur la biodiversité et les écosystèmes

Présentation des documents

Document 7 : Un rapport alarmant de l'IPBES
Ce document montre quelles sont les catégories d'espèces menacées à l'échelle mondiale. L'IPBES (plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques) explique que sur 10 millions d'espèces environ, 1 million sont ainsi menacées.

Document 8 : Espèces menacées et extinctions
Il s'agit d'un graphique représentant les espèces menacées en fonction de différents scénarios du GIEC. Plus la température augmente, plus les différentes espèces sont menacées.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 9 : Développement des espèces envahissantes : l'exemple du moustique tigre en France
Ce document représente des informations relatives à l'évolution du moustique tigre sur le territoire français métropolitain. Son cycle de développement est raccourci avec l'augmentation de la température.

Ressources complémentaires :

- Vidéo d'*Euronews* sur le moustique tigre : https://www.youtube.com/watch?v=JatLzYTp23o
- Article sur le moustique tigre : https://reseauactionclimat.org/rechauffement-moustique-tigre/
- Vidéo de France TV sur l'IPBES : https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/biodiversite/video-le-rapport-alarmant-de-l-ipbes-la-biodiversite-se-meurt-nos-modes-de-vie-sont-en-sursis_3431015.html
- Article de *Marianne* sur la définition des espèces invasives : https://www.marianne.net/societe/moustiques-tigres-frelons-dasie-le-temps-des-especes-invasives
- Article de *Sciences et avenir* sur le déplacement des moustiques tigres : https://www.sciencesetavenir.fr/animaux/insectes-invasifs-les-moustiques-tigres-voyagent-en-europe-dans-les-voitures_121384
- Un article de l'Observatoire national de la biodiversité sur l'évolution des espèces invasives : http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/fr/indicateurs/evolution-du-nombre-moyen-despeces-exotiques-envahissantes-par-departement-metropolitain
- Le coût des espèces invasives (*Sciences et avenir*) : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/12-especes-invasives-qui-coutent-tres-cher-a-la-france_16864
- Article de *Libération* sur les espèces invasives : https://www.liberation.fr/planete/2018/05/17/des-especes-s-eteignent-d-autres-proliferent_1650880

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Avoir résumé les impacts directs et indirects du changement climatique sur l'environnement.
Le changement climatique a pour conséquence :

- une élévation du niveau de la mer et potentiellement la submersion de villes côtières (ex. : Cherbourg), ou même d'îles comme les Maldives ;
- une hausse des températures sur les territoires pouvant aller jusqu'à 3 °C d'ici 2050 ;
- des événements climatiques extrêmes qui sont de plus en plus fréquents (inondations, feux de forêts, sécheresses, cyclones, ouragans, crues, baisse de l'enneigement, etc.) ;
- le développement d'espèces invasives (ex. : moustique tigre) ;
- la stagnation des rendements dans les cultures.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Avoir évalué les risques (environnementaux, humains, etc.) selon les différents scénarios du GIEC.

D'après le document 2, l'élévation du niveau de la mer dans le département de la Manche dépendrait du scénario du GIEC. Selon le scénario RCP 4.5, correspondant à une atténuation des émissions de GES (gaz à effet de serre), où le forçage radiatif est stabilisé avant 2100, le niveau de la mer s'élèverait de 0,32 m en 2100 et de 5 m en 2500. Selon le scénario 8.5 (scénario pessimiste), correspondant à un scénario extrême où les émissions de GES s'accroissent, on estime une élévation de 1 m en 2100 et de 13 m en 2500.

Les conséquences de cette élévation du niveau marin sont la disparition de certains territoires par immersion, la modification des écosystèmes, le relogement des populations, des migrations importantes, des problèmes économiques, la perte de patrimoine culturel, etc. L'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes pourra générer des décès liés aux canicules, la destruction de certains écosystèmes, la disparition partielle ou totale des glaciers, des problèmes économiques liés à la gestion des ressources et le développement des espèces invasives sur le territoire.

3. Avoir ordonné les idées pour établir des liens de cause à effet.

Pour l'oral : l'objectif est d'être convaincant. Aussi, pourquoi ne pas sensibiliser la tribune avec des images avant/après (aide : http://flood.firetree.net/). Il faut également bien organiser les idées.

Dans un premier temps, on pourra expliquer ce qu'est le GIEC et pourquoi le niveau des mers va augmenter. Ensuite, on verra les conséquences de cette élévation du niveau marin. Enfin, on montrera à l'aide de la carte quelles sont les conséquences du changement climatique sur le territoire.

4. À l'aide d'une recherche documentée, identifier des pistes de solutions pour lutter contre le changement climatique.

Voir les ressources complémentaires.

Groupe 2 :

1. Avoir résumé les impacts directs et indirects du changement climatique sur l'environnement.

D'après le document 4, l'augmentation de la concentration en CO_2 atmosphérique va générer une augmentation de la solubilisation du CO_2 dans l'eau. À la suite de plusieurs réactions chimiques, cela va engendrer une augmentation du nombre de protons (H^+) dans les océans, ce qui serait à l'origine d'une diminution du pH et donc d'une augmentation de l'acidité dans les océans.

L'acidification des océans a des impacts sur la biodiversité marine, comme par exemple la dégradation des coquilles calcaires, comme celle de *Thecosomata*. On observe également des modifications des structures internes chez certains poissons, comme le bar. L'acidification peut enfin générer des changements de comportement chez les bancs de poissons, comme des groupes plus espacés.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Avoir évalué les risques (environnementaux, humains, etc.) selon les différents scénarios du GIEC.

Selon le scénario RCP 2.6, le pH sera entre 8,0 et 8,1 en 2100, alors que pour le scénario RCP 8.5, on atteint une valeur comprise entre 7,7 et 7,8. Actuellement, le pH des océans est de 8,2. L'échelle du pH est une échelle logarithmique, ce qui signifie que la moindre modification du pH a un grand impact sur l'acidité du milieu.

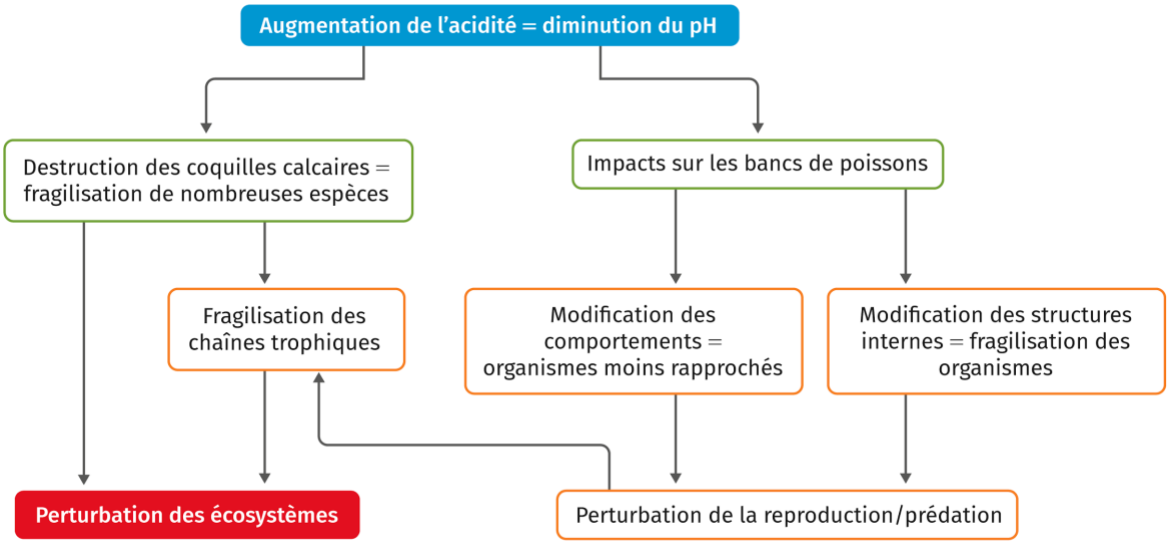
Une augmentation de l'acidité peut avoir des conséquences importantes sur la biodiversité et sur les interactions dans un écosystème. Une diminution importante du pH va générer la disparition des organismes à coquille calcaire. Dans le document 6, on comprend que pour le scénario RCP 8.5 (scénario pessimiste), des organismes à coquille calcaire comme *Thecosomata* vont peu à peu disparaître. Ces organismes font partie de plusieurs interactions dans l'écosystème et notamment dans les chaînes trophiques. Ils sont souvent à la base de l'alimentation de certains poissons. En disparaissant, les chaînes trophiques seront alors fragilisées, ce qui entraînera la disparition de nombreuses autres espèces.

Pour les bancs de poissons, une baisse du pH va générer des différences de structuration osseuse qui vont se généraliser à la place des structures cartilagineuses. La modification des comportements peut influencer plusieurs facteurs : la reproduction, la prédation, la socialisation, etc.

3. Avoir ordonné les idées pour établir des liens de cause à effet.

L'objectif est de structurer les idées à l'oral. On peut générer une carte mentale pour mieux organiser l'acheminement d'idées.

Exemple :



4. À l'aide d'une recherche documentée, identifier des pistes de solutions pour lutter contre le changement climatique.

Voir les ressources complémentaires.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Groupe 3 :

1. Avoir résumé les impacts directs et indirects du changement climatique sur l'environnement.

L'altération des milieux par l'activité humaine menace 1 million d'espèces sur les 10 millions d'espèces recensées par l'IPBES. Plus la température augmente, plus le pourcentage d'espèces menacées augmente. Le réchauffement climatique peut par exemple générer des problèmes de reproduction, comme c'est le cas chez la tortue Luth. L'augmentation de la température du sable va entraîner uniquement le développement des tortues femelles, voir stopper le développement des tortues.

L'augmentation de la température liée au réchauffement climatique va augmenter le développement d'espèces invasives, comme le moustique tigre, car il va permettre le raccourcissement de son cycle de développement. On remarque ainsi que le moustique tigre s'installe dans de plus en plus de départements français métropolitains.

2. Avoir évalué les risques (environnementaux, humains, etc.) selon les différents scénarios du GIEC.

Aujourd'hui, on recense 1 million d'espèces menacées, ce qui est une conséquence de la destruction de leur milieu naturel. Le changement climatique est un facteur important de modification des milieux et des écosystèmes, ce qui implique que le nombre d'espèces menacées risque d'augmenter dans les années à venir.

Chaque scénario implique une augmentation de la température et plus cette augmentation est importante, plus le nombre d'espèces menacées est important. Dans le scénario le plus pessimiste, la communauté scientifique estime qu'environ 65 % des plantes, 40 % des oiseaux, 60 % des mammifères, 55 % des amphibiens et 35 % des reptiles seront menacés d'extinction.

Comme chaque scénario du GIEC implique une hausse de température, cela amènera à une amplification du développement des espèces invasives, comme le moustique tigre (diminution du cycle de développement, augmentation des températures qui permettra une plus grande étendue des zones d'expansion de cette espèce).

Le changement climatique implique des risques sanitaires, écologiques et économiques.

3. Avoir ordonné les idées pour établir des liens de cause à effet.

Il faut essayer de convaincre l'auditoire en donnant des chiffres clefs et illustrer les propos avec des graphiques et des images d'espèces qui sont potentiellement menacées.

4. À l'aide d'une recherche documentée, identifier des pistes de solutions pour lutter contre le changement climatique.

Voir les ressources complémentaires.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Protocoles et résultats expérimentaux

1. Réalisation d'un indicateur coloré pour mesurer le pH d'un milieu

Matériel nécessaire :

- chou rouge,
- casserole ou bouilloire,
- 1 litre d'eau salée à 35 ‰,
- acide chlorhydrique à 1 M,
- soude (NaOH) à 0,1 M ou lessive en poudre,
- eau distillée,
- 2 bouteilles en verre (1 et 2) avec des couvercles,
- eau salée à 35 ‰,
- tubes à essai.

Protocole :

- Dans une casserole d'eau bouillante ou une bouilloire, infuser des feuilles de chou rouge (1 feuille en moyenne pour 500 mL d'eau, pendant 5 min).
- Récupérer le jus (bleu foncé) et le diluer (1 volume de jus pour 7 volumes d'eau) dans l'eau salée pour obtenir une coloration bleu clair. L'indicateur coloré est prêt. Afin de mettre en évidence les propriétés de l'indicateur coloré « jus de chou rouge », verser 10 mL de jus de chou rouge dilué dans 3 tubes à essai.
- Dans le tube 1, ajouter 1 mL d'acide chlorhydrique 1M pour acidifier le milieu. On obtient une coloration rose dans un milieu acide.
- Dans le tube 2, ajouter 1 mL d'eau distillée, ce qui engendre une coloration bleue violette.
- Dans le tube 3, déposer 1 mL de soude (ou un peu de lessive en poudre) pour rendre le milieu basique. On obtient une coloration verte.
- Dans les bouteilles en verre, placer de l'eau salée et l'indicateur coloré jusqu'à mi-hauteur
- Ne rien ajouter d'autre dans la bouteille 1 « témoin ».
- Ajouter du CO_2 dans la bouteille 2 « expérience ». Pour ajouter du CO_2, on peut par exemple mettre une bombe à CO_2, ou bien en fabriquer de manière artisanale (voir protocole ci-après).

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

2. Protocole pour fabriquer du CO_2 de manière artisanale

Matériel :

- 2 bouteilles en plastiques avec bouchons,
- un tuyau ou une paille,
- de quoi colmater (ex. : patafix),
- de l'eau de chaux,
- du vinaigre,
- du bicarbonate de soude,
- une feuille de papier essuie-tout.

Protocole :

- Réaliser un trou dans les 2 bouchons pour pouvoir y placer le tuyau.
- Placer un peu d'eau de chaux dans la bouteille A, la fermer avec un bouchon troué dans lequel on a réalisé au préalable un trou pour placer le tuyau.
- Vider la bouteille de son air.
- Dans la bouteille B, placer du vinaigre et, dans le papier essuie-tout, placer 4 cuillères à café de bicarbonate de soude (le papier essuie-tout sert ici de retardateur).
- Fermer les deux bouteilles communicantes avec le tuyau et laisser la réaction agir. La bouteille 1 se remplit de CO_2.

Résultats attendus :
À voir sur : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1354

3. Utiliser une sonde pH ExAO

Matériel :

- sonde pH ExAO,
- eau distillée,
- cuve ExAO,
- paille.

Protocole :

- Placer de l'eau dans une cuve ExAO.
- Placer la sonde ExAO dans la cuve.
- Démarrer l'enregistrement.
- Placer la paille dans la cuve et souffler (l'air expiré contient du dioxyde de carbone).

Résultats attendus :
Le pH va diminuer lorsque le CO_2 sera incorporé dans l'eau. Voir résultats dans cette vidéo (Tara expéditions) :
https://www.youtube.com/watch?time_continue=90&v=epDWuf-J9p0&feature=emb_logo

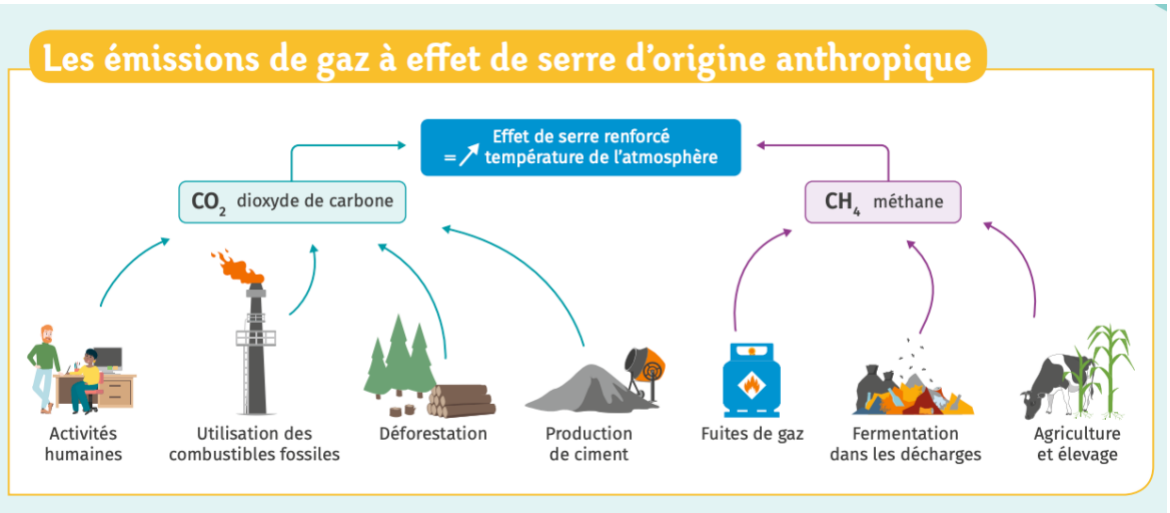
Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

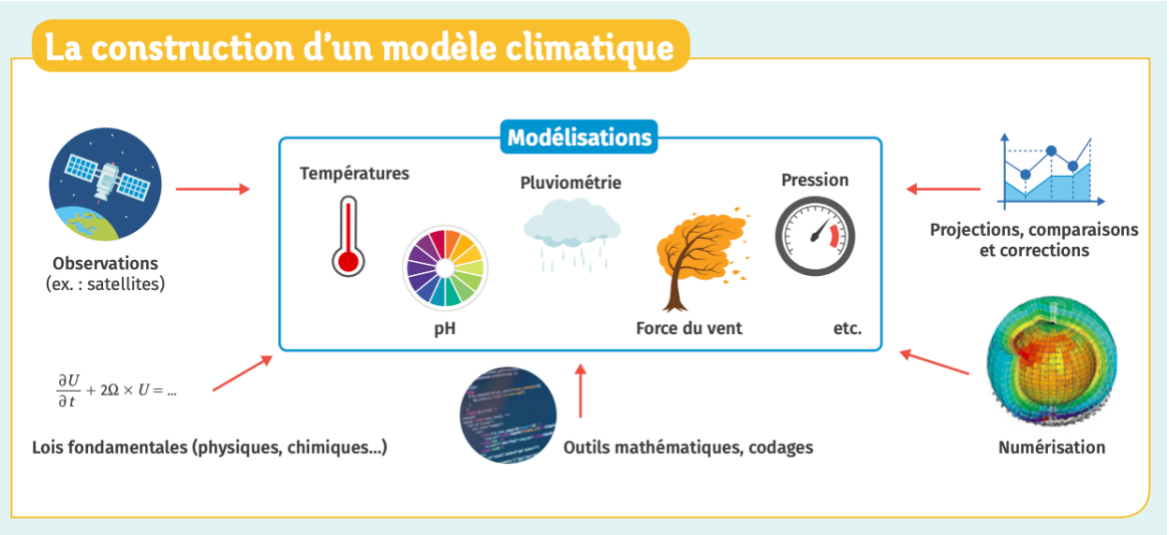
Ressources complémentaires :

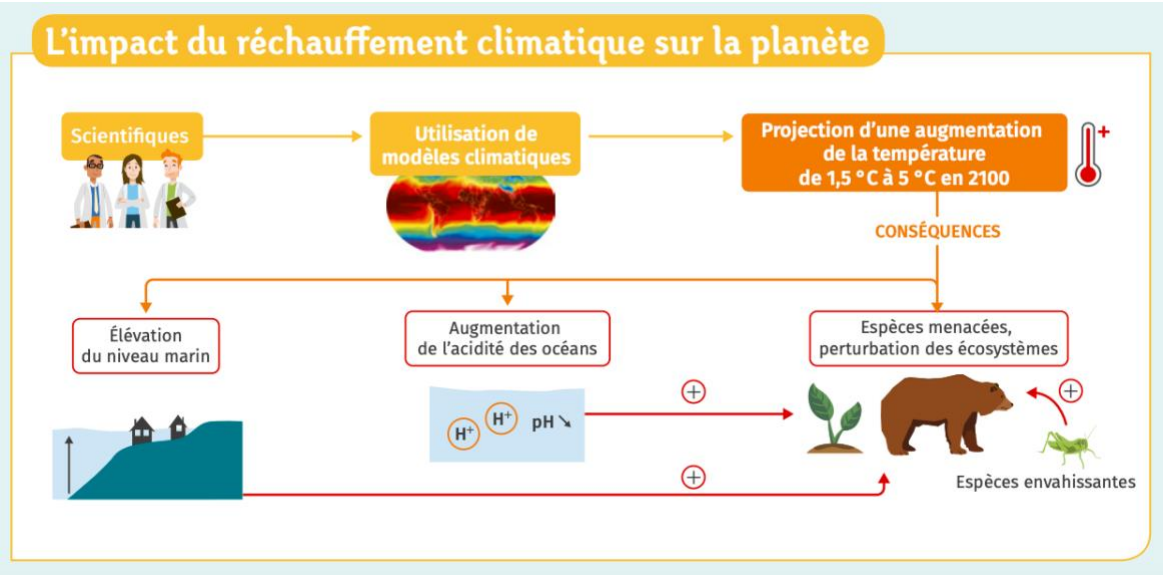
- Quelques sources pour trouver des conseils simples pour lutter contre le réchauffement climatique : https://www.terrafemina.com/article/40-petits-gestes-pour-lutter-contre-le-rechauffement-climatique-au-quotidien_a335337/1
- Vidéo de la Fondation Nicolas Hulot qui donne 6 gestes simples pour lutter contre le réchauffement climatique : https://www.youtube.com/watch?v=hYu3YLtfqdc
- Infographie regroupant des gestes simples pour lutter contre le réchauffement climatique : http://blog.nicotcha.com/post/2013/11/15/10-GESTES-POUR-REDUIRE-LA-CONSOMMATION-D-ENERGIE-DANS-LE-CADRE-DU-PLAN-CLIMAT-DE-TOUR%28S%29PLUS-%3A%3A-D%C3%A9pliant3
- Émission pour la Terre de France 2 : https://www.france.tv/france-2/l-emission-pour-la-terre/
- Article dans *Le Monde* qui donne des gestes pour combattre l'acidification des océans : https://www.lemonde.fr/blog/oceanclimat/2015/11/26/5-gestes-simples-pour-combattre-lacidification-des-oceans/
- Article d'Océan campus sur l'origine et les conséquences de l'acidification des océans (PDF) : https://fr.oceancampus.eu/files/ressources/_text_file/dzw.pdf
- Comment limiter son impact sur la biodiversité (Brut) : https://www.youtube.com/watch?v=_iFvmSyfsXE
- « Quelles solutions reste-t-il pour sauver la biodiversité ? », vidéo de *Le Monde* : https://www.youtube.com/watch?v=wD091fJMeU4
- Vidéo de l'UNESCO pour éduquer à la biodiversité : https://www.youtube.com/watch?v=GuS9EU4iRjw
- Interview de Marc André Selosse : sur la préservation de la biodiversité des plantes cultivées : https://www.youtube.com/watch?v=D_8MtYI-JBQ
- Vidéo de Décod'actu sur la disparition des espèces : https://www.youtube.com/watch?v=jROimBXPnqI

Document sous licence libre Creative Commons

Bilan (p. 61)







Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 62)

1. Les scénarios du GIEC évaluent une augmentation de la température de l'atmosphère en 2100 équivalente à :

b. 1,5 °C à 5 °C

2. L'IPBES évalue le nombre d'espèces menacées par les activités humaines à :

c. 1 000 000

3. Dans les modélisations du GIEC, les océans vont connaître :

a. Une diminution du pH

4. Le scénario le plus pessimiste du GIEC est le :

c. RCP 8.5

5. L'augmentation de la température prévue par les modèles climatiques est principalement due :

b. à l'augmentation des gaz à effet de serre d'origine anthropique.

6. L'évaluation, puis la validation de la pertinence des modèles climatiques sont possibles grâce :

a. à l'application du modèle sur des données paléoclimatiques.

7. L'industrie cimentière émet des gaz à effet de serre surtout lors :

b. de la cuisson, nommée clinkérisation.

8. L'élévation du niveau de la mer en 2100 avec les projections RCP 8.5 est estimée à :

b. 1 m

9. Le principal gaz à effet de serre d'origine humaine au niveau quantitatif est :

a. le dioxyde de carbone

10. Justifier cette phrase du climatologue Jean Jouzel : « On n'est plus dans le futur : ce sont les enfants d'aujourd'hui, ceux des cours d'école, qui pourraient subir ces étés à 50 °C ».
Tous les scénarios du GIEC, du plus optimiste au plus pessimiste, prévoient une augmentation de la température liée à l'amplification de l'effet de serre générant le réchauffement climatique, et dont l'origine est l'augmentation des gaz à effet de serre anthropiques. Les étés vont devenir de plus en plus chauds et il y a aura une augmentation des phénomènes climatiques extrêmes, comme les canicules et les sécheresses. Les étés à 50 °C vont devenir une réalité dans les années à venir.

A. L'oursin de gauche a grandi dans un milieu :

a. au pH plus acide.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 63)

11. Evolution des glaciers métropolitains

Compétence principalement travaillée : Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique

Correction :

1. On constate depuis les années 1980 que la température au niveau du massif des Pyrénées est supérieure à la moyenne, allant de 0 à 1,5 °C. En mettant en lien les photos, on constate un recul des glaciers. L'augmentation de la température peut entraîner la disparition des glaciers.

Suggestion de questions supplémentaires :

2. **Expliquer comment évolue la température dans les Pyrénées.**
De 1960 jusqu'à 1980 environ, on constate que la température est globalement plus froide que la moyenne, soit environ -0,75 °C. A partir des années 1980, on constate une augmentation de l'écart de température par rapport à la moyenne, soit environ 1 à 1,5 °C.

Sources/Bibliographie :

- Article de *Libération* sur les glaciers des Pyrénées : https://www.liberation.fr/france/2018/12/13/changement-climatique-les-pyrenees-de-moins-en-moins-enneigees_1697258
- Article, photos et graphiques concernant les glaciers des Pyrénées : https://www.climat-en-questions.fr/reponse/evolution-actuelle/quantites-glace-sur-planete-par-frederique-remy-etienne-berthier

Ressources pour aller plus loin :

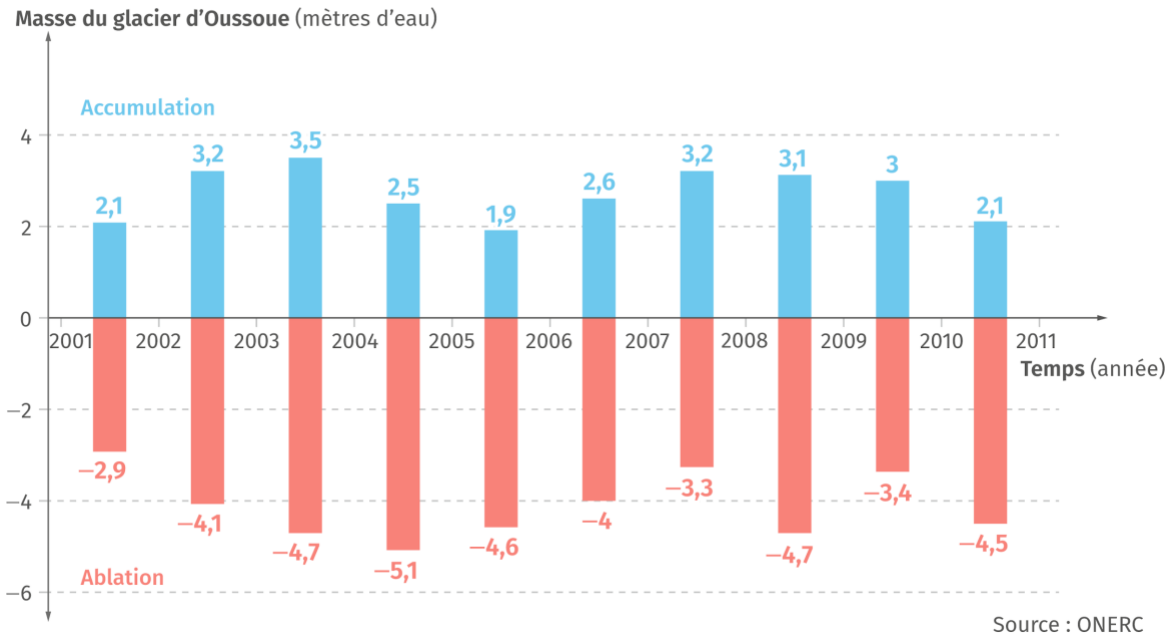
- Article « Impacts du changement climatique : Montagnes et glaciers » sur le site du Ministère de la transition écologique et solidaire : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-montagne-et-glaciers

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique

1. Calculer les variations annuelles de la masse du Glacier d'Ossoue entre 2001 et 2011 (différence entre accumulation et ablation de neige).



Variations annuelles = 2,1 – 2,9 + 3,2 – 4,1 + 3,5 – 4,7 + 2,5 – 5,1 + 1,9 – 4,6 + 2,6 – 4 + 3,2 – 3,3 + 3,1 – 4,7 + 3 – 3,4 + 2,1 – 4,5 = -14,1 m
Le glacier a perdu 14 m d'équivalent en eau en l'espace de 10 ans.

12. Sécheresse et restrictions d'eau

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet

Correction :

1. On remarque que de nombreuses régions sont touchées par les restrictions en eau :
   - dans le sud-ouest : Poitou-Charentes, Aquitaine, Midi Pyrénées ;
   - dans le sud-est : PACA, Languedoc Roussillon ;
   - dans le nord-est : Champagne Ardennes ;
   - dans le centre : Centre-Val de Loire, etc.

Ces régions correspondent aux régions agricoles qui nécessitent d'être irriguées.

2. Causes : sécheresses liées à des canicules correspondant aux conséquences du réchauffement climatique (perturbation des régimes de pluies, augmentation de la température, etc.)
Conséquences : diminution des rendements agricoles, affectation de la biodiversité locale, assèchement des sols, incendies, etc.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Évolution future : Dans un contexte de réchauffement climatique, les sécheresses sont amenées à être de plus en plus fréquentes, ce qui pourrait conduire à des restrictions d'eau plus fortes. Cependant, une recrudescence des événements météorologiques extrêmes, tels que les fortes pluies associées à des inondations, est aussi observée. L'évolution future de ces restrictions est donc fortement dépendante des régions.

Sources/Bibliographie :

- Site Propluvia : http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp
- Article du *Journal de l'environnement* : http://www.journaldelenvironnement.net/article/la-france-a-echoue-a-proteger-ses-ressources-en-eau,87097

Ressources pour aller plus loin :

- Article de *Le Monde* sur la sécheresse et les restrictions d'eau : https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/09/20/secheresse-des-restrictions-d-eau-mises-en-place-dans-la-quasi-totalite-des-departements-metropolitains_6012393_3244.html

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 64)

13. Récifs coralliens et températures

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet

Correction :

1. L'augmentation de la température entraîne une diminution de la densité de zooxanthelles au sein du polype, de 8×10^5 cellules·cm^{-2} à 4×10^5 cellules·cm^{-2}.
Le polype et les zooxanthelles vivent en symbiose, l'expulsion des zooxanthelles entraîne le blanchissement des coraux et donc leur mort. Une diminution des coraux entraîne également une diminution de la biodiversité environnante.

Sources/Bibliographie :

- Sujet Bac S, Nouméa, 2017.

Ressources pour aller plus loin :

- Vidéo de Brut sur le blanchissement des coraux : https://www.youtube.com/watch?v=z-_dfreVPkY
- Vidéo sur l'histoire d'un corail : https://www.youtube.com/watch?v=7s8IgEiVqog

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet

1. Interpréter les résultats de cette expérience et conclure sur le métabolisme des zooxanthelles.

Document supplémentaire : effets de différents milieux de culture sur l'activité métabolique des zooxanthelles

3 milieux sont réalisés :

- milieu 1 : des zooxanthelles isolées dans une eau de mer filtrée enrichie en CO_2 radioactif ;
- milieu 2 : des polypes associés aux zooxanthelles dans une eau de mer filtrée enrichie en CO_2 radioactif ;
- milieu 3 : des polypes dépourvus de zooxanthelles dans une eau de mer filtrée enrichie en CO_2 radioactif.

On détecte alors la radioactivité dans diverses molécules organiques contenues dans les zooxanthelles et dans les cellules du polype au cours du temps à l'obscurité et à la lumière.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

		Détection de la radioactivité dans les zooxanthelles isolées du milieu 1	Détection de la radioactivité dans les cellules du polype associées aux zooxanthelles du milieu 2	Détection de la radioactivité dans les cellules du polype dépourvues de zooxanthelles du milieu 3
À l'obscurité		–	–	–
À la lumière (temps en secondes)	5	+	–	–
	30	+	–	–
	360	+	+	–

Légende :
(+) : radioactivité détectée
(–) : radioactivité non détectée

Source : sujet Bac de SVT, Amérique du Sud, 2015.

On remarque que dans la colonne 1, au bout de 5 secondes, il y a présence de matières organiques radioactives (acides aminés, glucose, etc.) dans les zooxanthelles. C'est le CO_2 qui est radioactif, cela signifie que ces matières organiques ont été synthétisées à partir du CO_2 radioactif. À l'obscurité, il n'y a pas de matière organique radioactive.
Les zooxanthelles utilisent le CO_2 pour produire des matières organiques comme le glucose à la lumière : le métabolisme utilisé est donc la photosynthèse. Les zooxanthelles sont des organismes autotrophes.
D'après la colonne 3, les cellules du polype dépourvues de zooxanthelles n'ont pas synthétisé de molécules organiques radioactives à la lumière et à l'obscurité : elles ne peuvent pas réaliser la photosynthèse.
On observe dans la colonne 3 que les cellules du polype associé aux zooxanthelles contiennent des matières organiques radioactives au bout de 360 secondes.
Ce sont les zooxanthelles qui ont produit ces matières organiques. À l'aide de la symbiose, le polype va utiliser les matières organiques fabriquées par les zooxanthelles par photosynthèse à la lumière pour se nourrir.

Document sous licence libre Creative Commons

14. Hamburgers et réchauffement climatique

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des liens de cause à effet

Correction :

1. La consommation de hamburger en France est très importante. Le choix du bœuf a plusieurs conséquences :
   - utilisation de grandes étendues de sol, ce qui contribue à la déforestation et engendre des perturbations des sols et des écosystèmes, participant ainsi au réchauffement climatique ;
   - utilisation importante des ressources d'eau ;
   - émissions importantes de gaz à effet de serre : 20 % des émissions mondiales sont liées aux émissions gazeuses des bovins. Les gaz à effet de serre ont un rôle direct dans le réchauffement climatique.

Un choix responsable et raisonné serait de réduire sa consommation de viande de bœuf.

Sources/Bibliographie :

- Article de *Sciences et avenir* sur le coût environnemental du bœuf : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/infographie-le-terrible-cout-environnemental-du-boeuf_14361

Ressources pour aller plus loin :

- Vidéo de *Le Monde* qui explique l'impact de la viande sur l'environnement en 4 min : https://www.youtube.com/watch?v=nVydgG2DFU0

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le coin des experts (p. 65-66)

15. Les coccolithophoridés et leur développement dans les océans

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet

Correction :

1. Lorsque le CO_2 atmosphérique augmente, il peut se solubiliser dans les océans. Cela permet dans un premier temps la réalisation de la photosynthèse par les coccolithophoridés. Cependant, une concentration atmosphérique croissante en CO_2 entraîne une diminution du pH, c'est-à-dire une augmentation de l'acidité.
On constate que le pH est de 8,12 au large de l'île de Pâques et de 8,06 au large du cap Horn. Cette augmentation d'acidité génère la destruction des plaques calcaires des tests des coccolithophoridés. Cette fragilisation des tests calcaires peut entraîner une perturbation des chaînes alimentaires, car les coccolithophoridés sont à la base de ces chaînes alimentaires.

Sources/Bibliographie :

- MNHN : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1354

16. Comparaison de modèles climatiques et données paléoclimatiques

Compétence principalement travaillée : Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique

Correction :

1. Température des océans lors du dernier maximum glaciaire -1 à -1,5 °C en moyenne par rapport à aujourd'hui.
Température des continents lors du dernier maximum glaciaire : -4 °C par rapport à aujourd'hui.

2. Si on regarde la température des océans, les modèles les plus précis sont ECBILTCLIO ou CCSM3, mais pour la température des continents, on constate une estimation à -2 °C (estimation plus faible que celle déterminée grâce aux pollens retrouvés).
Si on observe la température des continents, le modèle le plus précis est ECHAM 53, mais pour la température estimée des océans, on constate une température de -3 °C (estimation plus importante que celle déterminée par l'étude des fossiles de coraux).
Les modèles doivent toujours être confrontés aux données paléoclimatiques pour déterminer leur précision. Certains modèles sont plus pertinents pour le domaine continental, alors que d'autres sont plus pertinents pour le domaine océanique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sources/Bibliographie :

- Vidéos et diaporamas de conférences sur les modèles climatiques de David Pollack : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/simulation-des-conferences-des-parties-sur-le-changement-climatique/ressources-pedagogiques-et-questions-philosophiques/cop-21-des-ressources-scientifiques-et-des-actualites

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Mettre en évidence le rôle des différents paramètres de l'évolution climatique

1. Estimer les températures moyennes terrestre et océanique lors du dernier maximum glaciaire.
Température des océans lors du dernier maximum glaciaire: -1 à -1,5 °C en moyenne par rapport à aujourd'hui. Température des continents lors du dernier maximum glaciaire : -4 °C par rapport à aujourd'hui.

2. Déterminer le meilleur modèle pour le domaine continental.
Si on regarde la température des continents, le modèle le plus précis est ECHAM 53, mais si on regarde la température estimée des océans, on constate une température de -3 °C (estimation plus importante que celle déterminée par l'étude des fossiles de coraux).

3. Déterminer le meilleur modèle pour le domaine océanique
Si on regarde la température des océans, les modèles les plus précis sont ECBILTCLIO ou CCSM3, mais si on regarde la température des continents, on constate une estimation à -2 °C (estimation plus faible que celle déterminée grâce aux pollens retrouvés).

4. Expliquer alors pourquoi il est difficile de déterminer le meilleur modèle dans le cas présent.
Le modèle le plus précis pour les continents, ECHAM 53, est en fait beaucoup moins précis en ce qui concerne les données océaniques. De même, les modèles ECBILTCLIO ou CCSM3 sont en fait beaucoup moins précis en ce qui concerne les données continentales. Dans ce cas précis, il est donc difficile de définir le modèle qui sera le plus exact pour les continents et pour les océans.

17. L'écrevisse de Louisiane

Compétence principalement travaillée : Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet

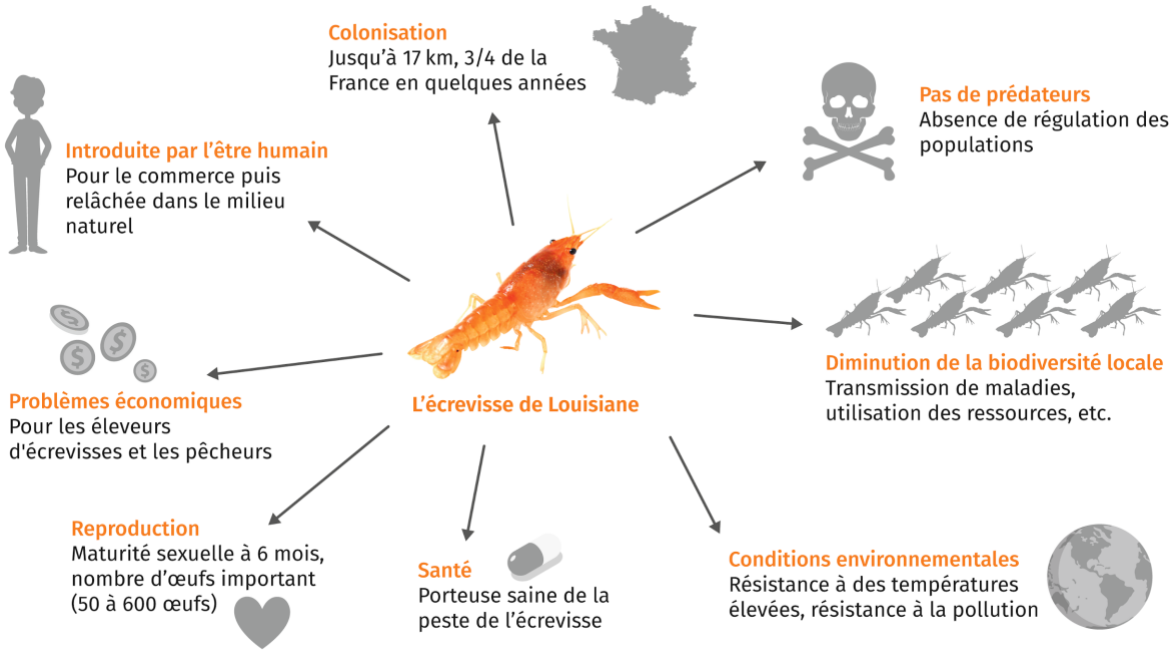
Correction :

1. Les espèces invasives sont des espèces introduites par l'être humain en dehors de leur aire de répartition, qui s'étendent et s'établissent en dehors de leur aire de distribution au détriment de la biodiversité locale.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'écrevisse de Louisiane a été introduite en France dans un objectif commercial, mais elle a ensuite été libérée dans le milieu naturel. Elle ne possède pas de prédateur et elle est capable de coloniser rapidement les milieux : on constate qu'entre 1977 et 2006, elle a colonisé plus des ¾ du territoire français. Elle se reproduit rapidement : la maturité sexuelle est acquise en 6 mois seulement (contre 2 à 4 ans pour l'écrevisse à pattes rouges). Le nombre d'œufs est également important (50 à 600).
L'écrevisse de Louisiane est une porteuse saine de la peste d'écrevisse : elle peut transmettre cette maladie à d'autres espèces d'écrevisses, alors qu'elle ne la développe pas elle-même. Cela provoque une diminution des autres espèces d'écrevisses et les fragilisent. Ainsi, cette espèce provoque une diminution de la biodiversité locale (voir le doc. 2). L'introduction d'une ou de 3 écrevisses entraîne une diminution du nombre d'espèces.
Elle est résistante à la pollution et ses besoins sont moindres par rapport aux autres écrevisses : elle peut se développer dans des concentrations importantes de phosphates et de composés azotés (donc dans des eaux polluées). Elle n'a pas besoin d'une eau très oxygénée.
Sa plage de confort de température est plus large que celle des autres écrevisses et elle se montre résistante à des températures allant jusqu'à 30 °C. Elle est ainsi beaucoup moins sensible au réchauffement climatique, et peut continuer de proliférer à des températures élevées, dans lesquelles les autres espèces d'écrevisses sont en inconfort.
Ainsi, le réchauffement climatique peut favoriser, de façon relative, le développement de cette espèce invasive, qui produit un impact majeur sur les écosystèmes terrestres et marins.

On peut résumer ces éléments dans le schéma suivant :



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Sources/Bibliographie :

- Vers une meilleure connaissance de l'écrevisse de Louisiane dans le département de l'Yonne : http://www.federation-peche-yonne.fr/federation/ckfinder/userfiles/files/Vers%20une%20meilleure%20connaissance%20de%20l%27%C3%A9crevisse%20de%20Louisiane%20dans%20le%20d%C3%A9partement%20de%20l%27Yonne.pdf
- Guide d'identification des écrevisses en France par la fédération de pêche : https://www.federation-peche64.fr/wp-content/uploads/2015/01/Guide-didentification-des-%C3%A9crevisses-en-France-m%C3%A9tropolitaine.compressed.pdf

Ressources pour aller plus loin :

- Reportage de France 3 sur l'écrevisse de Louisiane : https://www.youtube.com/watch?v=xq8Ysge4slo&t=6s

Document sous licence libre Creative Commons

Chapitre 4 : Énergie, développement et futur climatique

Présentation **2**
Activités **4**
Activité documentaire 1 : Production et consommation énergétique (p. 68-69) 4
Activité documentaire 2 : La Terre, un carrefour énergétique (p. 70) 8
Activité documentaire 3 : Empreinte carbone et impact écologique (p. 71) 12
Activité documentaire 4 : La pollution de l'air et ses conséquences (p. 72-73) 15
Activité de groupe 5 : Transition écologique et analyse des risques (p. 74-75) 19
Groupe 1 : Des risques sanitaires 19
Groupe 2 : Des risques pour les écosystèmes 20
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 20
Bilan (p. 77) **24**
Exercices **28**
Zone d'échauffement (p. 78) 28
L'atelier des apprentis (p. 79) 29
Le repaire des initiés (p. 80-81) 32
Le coin des experts (p. 82) 35

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation

Ce chapitre permet de comprendre que les choix de société ont un impact sur le climat. Que ce soit dans un but économique ou de productivité, les modes de consommation participent au réchauffement climatique. Il s'agit d'un chapitre à la croisée des SVT et des sciences physiques et chimiques, mais qui intègre également des éléments économiques indispensables à une vision d'ensemble de la question.

L'objectif des activités proposées est de proposer des outils tels que l'empreinte carbone d'un objet afin de permettre d'éclairer le choix de consommation futurs.
Une étude de divers documents actuels permet de rendre compte des populations vulnérables et de mieux prévoir le futur climatique, tout en sensibilisant aux risques écologiques.

Ce qui a été enseigné en seconde :
En SVT, Thème 2 : Les enjeux contemporains de la planète, partie « Vers une gestion durable des agrosystèmes »

Ce qui a été enseigné en première :
En Enseignement scientifique, Partie « Le Soleil, notre source d'énergie » :

- Partie : 2.2 - Le bilan radiatif terrestre
- Partie : 2.3 - Une conversion biologique de l'énergie solaire : la photosynthèse.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :
Ce chapitre s'inscrit dans une suite logique du chapitre 3 : après avoir identifié les causes du réchauffement climatique à travers différents modèles, on cherche ici à mieux comprendre les besoins énergétiques qui ont conduit à ce dérèglement et impacté les populations vulnérables. L'étude énergétique à travers différentes comparaisons et conversions sur des secteurs de consommation divers font le lien avec le thème 2.

Bibliographie :

- Jérémie PICHON, *Famille en transition écologique* : il s'agit d'un livre illustré enrichi de nombreux exemples chiffrés permettant d'évaluer l'impact quotidien sur l'environnement. On y voit également de nombreuses pistes de transition écologique.
- Agathe EUZEN *et al., Le développement durable à découvert*, CNRS éditions : ce livre rassemble les travaux de plus de cent chercheurs sur les risques climatiques. On y trouve une liste exhaustive de ces différents risques, ainsi que les raisons de l'importance de la mise en place rapide d'une transition écologique.
- Olivier JOLLIET *et al.*, *Analyse du cycle de vie* : ce livre explique les éléments et les outils permettant d'évaluer le cycle de vie d'un objet et ainsi de réaliser son bilan carbone.
- Hélène BINET et Louise PIERGA, *J'agis pour le climat* : ce livre donne de très nombreux exemples chiffrés sur la consommation et l'impact écologique sociétal et du mode de vie. On y trouve également une rubrique très intéressante sur l'utilisation du numérique et son impact écologique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sitographie :

- https://decrypterlenergie.org/ : ce site regroupe de nombreux éléments permettant de mieux comprendre les besoins et dépenses énergétiques. On y trouve également un descriptif des différentes ressources énergétiques fossiles ou renouvelables, ainsi que des mesures de l'impact de notre consommation énergétique sur la planète.
- Ressources chiffrées et descriptifs du bilan climat et énergie de la France : https://www.observatoire-climat-energie.fr/
- Source d'informations et d'analyses sur les actions climatiques dans de nombreux domaines (alimentaire, bâtiment, énergies, international, etc.) : https://reseauactionclimat.org/thematiques/emissions-cachees/
- Le site de l'agence internationale de l'énergie fournit des publications, des rapports et surtout des données sur les besoins et ressources énergétiques futures, ainsi que sur la consommation énergétique : https://www.iea.org/
- https://www.georisques.gouv.fr/ : permet d'avoir des données ciblées géographiquement sur les risques en France et sur leur évolution dans le temps.
- https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tous-les-chiffres?theme=3 : ce site gouvernemental recense de nombreuses données sur le développement durable.
- http://climatsoustension.com/ : excellente animation décrivant des conséquences climatiques à travers le monde par des histoires.
- Un site qui retrace l'historique de la découverte de l'effet de serre à l'apparition des coopérations internationales sur le climat : https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/decouverte-effet-de-serre-au-giec/ :
- http://www.eea.europa.eu/fr/ : site de l'agence européenne pour le climat.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activités

Dans un premier temps, il est important de prendre connaissance des différents facteurs à l'origine des émissions de CO_2 dans le monde, mais aussi des différents besoins et ressources énergétiques mondiales, ainsi que leur répartition inégale à l'échelle mondiale.
Les élèves traiteront ensuite de la différence entre stock et flux d'énergie, ainsi que des diverses unités permettant de comparer les ressources énergétiques à différentes échelles.
L'activité 3 permet d'appréhender des outils tels que l'empreinte carbone, afin de mieux prévoir l'impact écologique des objets et activités qui nous entourent.
Dans l'activité 4, un calcul des masses de CO_2 rejetées par différents carburants à partir de leur réaction de combustion sera proposé, ainsi qu'une analyse des produits rejetés lors de combustions incomplètes et les effets sur la santé que les produits de ces combustions peuvent avoir.
La dernière activité permet, à l'aide de documents scientifiques, d'analyser les différents risques liés au réchauffement climatique et d'y associer des préventions adaptées.

Activité documentaire 1 : Production et consommation énergétique (p. 68-69)

Cette activité a pour but d'identifier les ressources énergétiques utilisées sur Terre, mais aussi de comprendre leurs utilisations, ainsi que l'augmentation de leur production au cours du temps. Il s'agit donc de comprendre les enjeux mondiaux qu'impliquent cette consommation grandissante et d'observer la répartition de cette consommation par secteurs d'activités et par zone géographique. Une partie de la réflexion se base également sur le choix des ressources énergétiques utilisées pour répondre à cette demande.
Cette activité permet aussi de comparer les ressources énergétiques consommées à différentes échelles par rapport à celle produite par la Terre.

Lien avec le programme :
Cette activité introduit le chapitre avec les premiers items du point 1.4 « Énergie, choix de développement et futur climatique ».

Objectifs notionnels :

- L'énergie utilisée dans le monde provient d'une diversité de ressources parmi lesquelles les combustibles fossiles dominent.
- La consommation est très inégalement répartie selon la richesse des pays et des individus.
- La croissance de la consommation globale (doublement dans les 40 dernières années) est directement liée au modèle industriel de production et de consommation des sociétés.
- En moyenne, au niveau mondial, cette énergie est utilisée à parts comparables par le secteur industriel, les transports, le secteur de l'habitat et dans une moindre mesure, par le secteur agricole.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Objectifs méthodologiques :

- Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles (mondiale, nationale, individuelle, etc.).

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Le jour du dépassement mondial : un indicateur de consommation des ressources
Ce document permet de prendre conscience du rapport entre la quantité d'énergie produite sur Terre et celle consommée. Il permet, à l'aide d'une formule simple, d'utiliser un outil d'estimation et de comparaison de la consommation des ressources mondiales. On peut donc s'approprier les résultats et rendre compte d'une consommation excessive et inégale selon la zone géographique.

Document 2 : Évolution des différents types de production d'énergie dans le monde
Cette infographie montre que la consommation d'énergie a doublé en 40 ans et que celle-ci se concentre essentiellement sur les énergies fossiles. On observe une augmentation de l'utilisation des ressources renouvelables dans le temps, mais celle-ci reste aujourd'hui encore très faible.

Document 3 : Population, PIB et émissions de CO_2 à l'échelle mondiale
Ce document donne des pistes de réflexion sur les raisons de l'augmentation de la consommation énergétique et de l'augmentation des rejets de CO_2. Les émissions de CO_2 dans le monde augmentent de la même manière que la population mondiale et le PIB mondial.

Document 4 : Secteurs de consommation énergétique
Le document rend compte de la répartition de la consommation nationale et mondiale par secteur d'activité. On s'aperçoit que la répartition est sensiblement identique avec une majorité de la consommation dans l'industrie, le transport et le tertiaire.

Document 5 : Consommation énergétique, population et PIB de quelques pays en 2017
Ce document permet de faire un lien direct entre le PIB d'un pays et sa consommation énergétique. Il montre ainsi une inégalité de la consommation énergétique dans le monde.

Réponses attendues aux questions :

1.
$$J_{\text{France}} = \frac{B}{E} \times 365 = \frac{1,7}{4,7} \times 365 = 132$$
$$J_{\text{Canada}} = \frac{B}{E} \times 365 = \frac{1,7}{7,8} \times 365 = 80$$
$$J_{\text{Indonesie}} = \frac{B}{E} \times 365 = \frac{1,7}{1,7} \times 365 = 365$$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le jour du dépassement est donc le 12 mai en France. On voit que cette date est bien plus proche du début de l'année qu'à l'échelle mondiale : la France est en partie responsable de cette consommation excessive, elle consomme trois fois plus d'énergie qu'elle n'en produit par an.
Cette consommation est inégalement répartie. Avec les exemples proposés, on se rend compte que certains pays ont une consommation qui permet le renouvellement des ressources alors que d'autres épuisent les ressources.

2. Le document 1 permet de voir que le jour du dépassement est proche de l'équilibre en 1970 et que celui-ci est de plus en plus précoce depuis. Le document 2 montre que la consommation n'a cessé d'augmenter depuis quarante ans pour finalement doubler. On peut donc voir que cette augmentation de la consommation d'énergie se traduit directement par l'avancement du jour de dépassement mondial.

3. La production d'énergie est proche des 6 milliards de t.e.p dans les années 70, celle-ci provient essentiellement (5 milliards de t.e.p) de ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Aujourd'hui, la production est proche des 14 milliards de t.e.p et, bien que la part des énergies renouvelables soit plus importante, elles ne représentent pas plus de 2 milliards de t.e.p.

4. L'augmentation constante de la production d'énergie (doc. 3) s'explique par une croissance démographique et économique sur cette même période (doc. 2). On peut donc faire le lien entre une augmentation de la population et un besoin d'énergie croissant, mais également des besoins économiques plus importants.
Cette croissance de la production d'énergie a pour conséquence directe l'augmentation des émissions de CO_2 dans le monde. On peut donc s'inquiéter de la viabilité de ce modèle industriel qui nécessite toujours plus de production, ce qui a un impact direct sur l'environnement.

5. On s'aperçoit qu'à l'échelle nationale ou mondiale, la consommation d'énergie se concentre essentiellement dans le transport et l'industrie, ainsi que dans le secteur résidentiel et le tertiaire. Ces secteurs d'activités sont en lien avec la croissance démographique et économique déjà évoquée à la question 4.

6. En regroupant les différents résultats dans un tableau, on trouve :

Pays	Consommation par habitant (t.e.p/hab)	PIB par habitant
Chine	1,44	9,60
États-Unis	4,66	59,5
Indonésie	0,66	12,3
France	2,30	42,9
Canada	5,6	49,0

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ces résultats montrent que les pays et habitants les plus riches sont également ceux qui consomment le plus d'énergie. On peut donc parler d'inégalité énergétique dans le monde.

Ressources complémentaires :

- Le site de l'IEA recense de très nombreuses données internationales sur la consommation énergétique, les différentes ressources, l'impact carbone et les différents pistes de transition écologique : https://www.iea.org/
- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ : site du Ministère de la transition écologique et solidaire permettant d'avoir des renseignements sur les différents projets actuels.
- http://ccsti.imingo.net/climway/: il s'agit d'un jeu sérieux dont la mission est de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour minimiser l'impact de ses activités sur le climat et s'adapter au changement climatique en cours.
- https://www.footprintnetwork.org/ : le site de Global Footprint permet, à l'aide de cartes interactives mais également de tableaux, d'avoir de nombreuses données chiffrées. Ces données nous indiquent notamment la biocapacité et les empreintes carbone de chaque pays.
- http://www.explorateurs-energie.com/ : ce site éducatif recense les différentes sources d'énergie, fossiles et renouvelables. Il permet de mieux comprendre leur fonctionnement par de courtes animations.
- http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/energies/diverses-sources-d-energie.aspx : animation sur les différentes sources d'énergie.
- Animation sur les ressources primaires et secondaires : http://www.educapoles.org/fr/multimedia/animation_detail/sur_la_route_de_llectricit :
- https://www.universalis.fr/encyclopedie/energie-les-ressources/1-les-ressources-energetiques/ : ce site fait une étude exhaustive des différentes énergies avec des données exploitables, mais également une étude historique sérieuse. Cela permet une approche historique et économique, donc interdisciplinaire.
- https://www.youtube.com/watch?v=nG8zKm2z7VM : cette vidéo est en lien avec le document 1 de cette activité. Elle permet d'expliquer de manière simple et efficace le système permettant de calculer le jour de dépassement mondial.
- https://www.youtube.com/watch?v=JBCVCui6BH0 : vidéo très ludique et très compléte sur les différentes sources d'énergies et sur les inégalités mondiales.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 2 : La Terre, un carrefour énergétique (p. 70)

Cette activité a pour but d'évaluer et de comparer l'énergie présente sur Terre et dans l'espace qui nous entoure sous différentes formes.
Les élèves pourront ainsi prendre conscience des différentes sources et des divers flux présents sur Terre. Cette activité de comparaison permet aussi de manipuler différentes unités de puissance et d'énergie, et de s'entraîner à la conversion et à la comparaison de grandeurs.

Lien avec le programme :
L'étude du point 1.4 « Énergie, choix de développement et futur climatique » est poursuivie dans cette activité.

Objectifs notionnels :
- Les énergies primaires sont disponibles sous forme de stocks (combustibles fossiles, uranium) et de flux (flux radiatif solaire, flux géothermique, puissance gravitationnelle à l'origine des marées).

Objectifs méthodologiques :
- Utiliser les différentes unités d'énergie employées (tonne équivalent pétrole (t.e.p), kWh, etc.) et les convertir en joules, les facteurs de conversion étant fournis.
- Comparer quelques ordres de grandeur d'énergie et de puissance : corps humain, objets du quotidien, centrale électrique, flux radiatif solaire, etc.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Quelques flux et stocks d'énergie présents sur Terre
Ce document synthétise les différents flux et stocks d'énergies. Il regroupe des informations au niveau spatial, mondial, mais également à l'échelle d'une habitation.
Les données sont dans des unités différentes les unes des autres, rendant la conversion obligatoire pour pouvoir les comparer entre elles.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. On peut synthétiser les flux et stocks dans le tableau suivant :

Flux	Stocks
- Flux solaire incident - Flux géothermique terrestre - Conversion d'énergie éolienne en électricité - Conversion d'énergie solaire en électricité - Conversion d'énergie nucléaire en électricité - Consommation électrique des humains (diverses conversions)	- Énergie stockée dans le Soleil - Énergie stockée dans le pétrole terrestre - Énergie stockée dans l'uranium terrestre - Chaleur (énergie thermique) stockée dans la Terre - Énergie électrique dans le réseau de distribution (voir Thème 2)

2. La Terre reçoit chaque seconde 174 000 TJ. Pour une année, l'énergie est donc de :
$E_{soleil} = 174000 \times 10^{12} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365,25 = 5,49 \times 10^{24}$ J.
Pour le stock d'uranium, on sait que 1 g équivaut à 72,6 GJ.
$E_{uranium} = 11,14 \times 10^{12} \times 72,6 \times 10^{9} = 8,09 \times 10^{23}$ J
Pour le stock de pétrole terrestre, celui-ci est de 223 Gt.e.p., ce qui correspond à une énergie de : $E_{pétrole} = 223 \times 10^{9} \times 4,19 \times 10^{10} = 9,34 \times 10^{21}$ J.
La consommation annuelle d'un ménage est de 2 812 kW·h, ce qui correspond à une énergie de : $E_{ménage} = 2812 \times 3,6 \times 10^{6} = 1,01 \times 10^{10}$ J.

On trouve ainsi, par ordre décroissant :

Source	Energie en joule (J)
Énergie solaire reçue par an	$5,49 \times 10^{24}$
Stock d'Uranium	$8,09 \times 10^{23}$
Consommation mondiale par an	$3,70 \times 10^{23}$
Stock de pétrole	$9,34 \times 10^{21}$
Géothermie terrestre par an	$1,45 \times 10^{21}$
Attraction lunaire	$7,92 \times 10^{19}$
Consommation électrique par an	$7,70 \times 10^{19}$
Nucléaire par an	$9,49 \times 10^{18}$
Parc éolien par an	$4,06 \times 10^{18}$
Parc photovoltaïque par an	$1,59 \times 10^{18}$
Consommation d'une habitation par an	$1,01 \times 10^{10}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

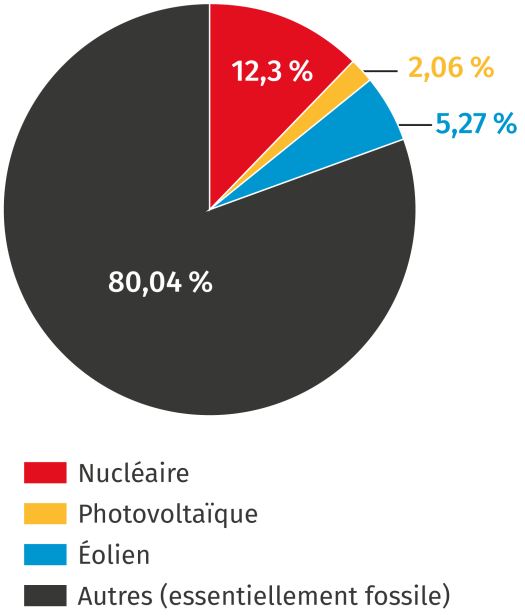
3. On a calculé que la Terre recevait $5,49 \times 10^{24}$ J, alors que l'énergie du parc éolien sur la même période est de $1,59 \times 10^{18}$ J.

On peut donc calculer le rendement suivant : $\text{rendement} = \dfrac{1,59 \times 10^{18}}{5,49 \times 10^{24}} = 0,000\ 000\ 29$

Les panneaux solaires récupèrent 0,000 029 % de l'énergie solaire reçue.

4. Les différentes productions d'électricité représentent dans la consommation mondiale :

Sources	Part
Nucléaire	12,3 %
Photovoltaïque	2,06 %
Éolien	5,27 %



La plus grande part de l'énergie mondiale provient des hydrocarbures.

5. La Terre est effectivement un carrefour énergétique, puisqu'elle possède différents stocks et est impliquée dans divers flux énergétiques. Les échanges avec l'extérieur (Soleil, Lune) sont également importants. L'ordre de grandeur des stocks et flux d'énergie est immense.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Ressources complémentaires :

- http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/energies/de-l-uranium-a-l-energie-nucleaire.aspx : animation présentant le fonctionnement d'une centrale nucléaire.
- Animation sur le fonctionnement de la fusion nucléaire présente au sein d'une étoile : http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/reaction-de-fusion.aspx.
- https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-les-energies-marines/une-energie-marine-bien-developpee-lenergie-des : ce site permet de mieux comprendre le phénomène des marées. On y voit également comment on peut exploiter l'énergie issue de ce phénomène.
- Le site d'EDF fournit des données de consommations au niveau national par type d'énergie. Il permet également de voir l'évolution des consommations au fil du temps : https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/la-consommation-d-electricite-en-chiffres
- https://www.energuide.be/fr/questions-reponses/combien-les-appareils-electromenagers-consomment-ils/71/ : ce site recense de manière précise et chiffrée la consommation énergétique des objets du quotidien. On y retrouve les ressources de l'habitat présent dans l'activité.
- Une fiche pédagogique comportant un descriptif de chaque énergie, dont l'énergie marémotrice, parfois complexe pour les élèves : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice :
- Document éduscol exhaustif sur le travail et la puissance. On y voit les différentes unités énergétiques permettant d'effectuer les conversions et comparaisons entre sources d'énergies : https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10110/10110-conversion-denergie-et-efficacite-energetique-ensps.pdf :
- Lien vers le chapitre sur le flux solaire dans le manuel d'Enseignement scientifique 1re : https://www.lelivrescolaire.fr/page/8373529

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 3 : Empreinte carbone et impact écologique (p. 71)

Cette activité a notamment pour objectif d'ouvrir la réflexion sur la pollution et la consommation d'énergie associée au numérique. La pollution est en effet souvent rattachée à quelque chose de physique : fumées, emballages, déchets, etc. En réalité, l'utilisation du numérique engendre la consommation de grandes quantités d'énergie qui génèrent de la chaleur et rejettent du CO_2. Le stockage d'informations numériques dans les *datacenters* du monde entier participe aussi au réchauffement climatique.
Un outil, l'empreinte carbone, permet d'étudier le cycle de vie d'un objet dans sa totalité, en prenant en compte sa fabrication mais aussi son transport, son utilisation ou encore son recyclage. Cet outil permet de comparer efficacement les rejets de CO_2 de différents objets et ainsi d'évaluer leur impact écologique.

Lien avec le programme : La troisième partie du 1.4 « Énergie, choix de développement et futur climatique », relative à l'empreinte carbone, est traitée dans cette activité.

Objectifs notionnels :

- L'empreinte carbone d'une activité ou d'une personne est la masse de CO_2 produite directement ou indirectement par sa consommation d'énergie et/ou de matière première.

Objectifs méthodologiques :

- Comparer sur l'ensemble de leur cycle de vie les impacts d'objets industriels (par exemple : voiture à moteur électrique ou à essence).
- À partir de documents, analyser l'empreinte carbone de différentes activités humaines et proposer des comportements pour la minimiser ou la compenser.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Énergie grise et empreinte carbone
Ce document fixe les définitions nécessaires pour la suite de l'activité, c'est-à-dire l'énergie grise et l'empreinte carbone, en donnant en exemple les rejets issus de différents formats physiques et de leurs équivalents numériques

Document 2 : Besoins énergétiques du numérique
Ce document permet de rendre compte de la part du numérique dans la consommation électrique globale en France. On peut également voir la quantité de CO_2 produite en France par quantité d'énergie produite. On peut ainsi évaluer la part du numérique dans la pollution atmosphérique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Cycle de vie d'un objet
Cette infographie permet d'identifier les éléments permettant de rendre compte des différents facteurs participant au cycle de vie d'un objet.

Réponses attendues aux questions :

1. On s'aperçoit que, pour de petites quantités d'informations, le numérique est préférable, car il rejette moins de CO_2. Cependant, dès que la quantité d'information devient plus importante, comme pour des jeux en streaming, le format numérique rejette plus de CO_2 que le format physique.

2. Chaque année, le numérique consomme 56,5 TW·h d'énergie électrique en France.
En sachant que la production d'1 kW·h d'électricité émet 53 g de CO_2 on trouve, $\text{masse de } CO_2 = 56,5 \times 10^{12} \times 53 = 2,99 \times 10^{15}$ g. Cette consommation engendre en France 2, 99 millions de tonnes de CO_2 (2,99 Mt).

3. La pollution routière est environ 24 fois supérieure à celle du numérique. Bien que non négligeable, la pollution issue du numérique n'est ainsi pas la source la plus polluante en France et il faut donc la relativiser.

4. Lors de la production et la fabrication d'un objet, le choix des matériaux utilisés et les méthodes de construction vont impacter l'empreinte carbone. Le choix du transport et du lieu de fabrication d'un objet vont avoir un impact la quantité de CO_2 engendrée par cet objet.
L'utilisation joue aussi un rôle, car si un objet nécessite des entretiens polluants ou très réguliers, l'empreinte carbone en sera influencée.
On peut noter aussi la durée de vie de l'objet et tous les rejets polluants que peut entraîner son recyclage.

5. Pour limiter l'empreinte carbone d'un objet, il faut regarder le lieu de production, la durée de vie de l'objet et les matériaux de fabrication. Il est aussi intéressant de se renseigner sur les filières de tri et de recyclage mise en place pour ce type d'objet.

6. L'affirmation proposée est à nuancer. Le numérique rejette également du CO_2 en grande quantité, bien que cette pollution ne soit pas la plus visible.
Le numérique est une alternative efficace au format physique et permet ainsi de réduire la pollution mondiale. Cependant, l'augmentation du numérique et son utilisation parfois excessive peuvent se montrer néfaste, notamment pour des fichiers nécessitant une grande quantité d'informations.
Le numérique est donc **souvent** une solution écologique, mais pas toujours.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ressources complémentaires :

- http://www.cite-sciences.fr/archives/francais/ala_cite/expo/tempo/planete/portail/labo/empreinte.html : cette animation permet de calculer une empreinte carbone.
- Animation plus interactive pour calculer son empreinte carbone (en anglais) : https://www.oce.global/animations/CarbonFootprint-final/footprint.html.
- Météo France propose une animation pédagogique sur le cycle du carbone et son impact sur l'environnement : http://education.meteofrance.fr/lycee/animations/le-cycle-du-carbone
- Guide pratique très intéressant sur l'empreinte carbone issue du numérique. On y trouve les problèmes et risques liés au numérique, mais aussi des pistes de prévention pour y faire face :
- https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf.
- Des comparatifs de pollutions numériques en fonction du support utilisé. Cela permet de comprendre que l'évolution de nos systèmes numériques impacte directement les émissions de gaz à effet de serre : https://www.wwf.fr/agir-quotidien/numerique.
- Une vidéo montrant un comparatif entre la voiture électrique et la voiture à essence. On s'aperçoit que l'empreinte écologique est très proche et qu'il est donc important de faire une étude du cycle de vie d'un objet pour s'en rendre compte : https://www.youtube.com/watch?v=QoBTr_CSMzs.
- Une vidéo qui explique à partir d'un exemple précis comment le cycle de vie d'un objet permet de calculer son empreinte carbone : https://www.youtube.com/watch?v=YEmBn8_nVeM&t=55s
- Un article de *20 minutes* illustrant comment il est possible en France de réutiliser les pertes énergétiques issues du numérique afin de limiter le réchauffement climatique : https://www.20minutes.fr/paris/2068527-20170516-data-center-chauffe-eau-piscine-paris-27.
- Vidéo sur l'impact écologique des *data centers* (centres de données) et sur leur fonctionnement : https://www.youtube.com/watch?v=hfPalDrX6Jw.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 4 : La pollution de l'air et ses conséquences (p. 72-73)

Cette activité permet d'étudier d'un point de vue scientifique la formation des gaz à effet de serre, ainsi que des gaz toxiques, à travers différentes équations chimiques. On peut ainsi évaluer la quantité de gaz produite à partir d'une quantité de combustible, ainsi que les facteurs aggravant la formation de polluants.
Dans un deuxième temps, les documents permettent de mieux comprendre les effets de la pollution atmosphérique sur le corps humain. On pourra aussi faire le lien direct entre l'augmentation de certains gaz dans l'atmosphère et l'augmentation des problèmes de santé.

Lien avec le programme :
La 2e partie du point 1.4 « Énergie, choix de développement et futur climatique » est ici traitée.

Objectifs notionnels :
- La combustion de carburants fossiles et de biomasse libère du dioxyde de carbone, des aérosols et d'autres substances (N_2O, O_3, suies, produits soufrés) qui affectent la qualité de l'air respiré et la santé.

Objectifs méthodologiques :
- Calculer la masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie dégagée pour différents combustibles (l'équation de réaction et l'énergie massique dégagée étant fournies).
- À partir de documents épidémiologiques, identifier et expliquer les conséquences sur la santé de certains polluants atmosphériques, tels que les particules fines résultant de combustion.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Combustion et production de CO_2
On donne l'équation de combustion du diesel et du charbon. On peut donc repérer les réactifs et produits mis en jeu lors de cette réaction, mais également les proportions de combustibles utilisés et de dioxyde de carbone émis.

Document 2 : Différents polluants de l'air
Cette infographie permet de voir les différents polluants de l'air également émis lors d'une combustion. On peut identifier les principaux secteurs de production de ces polluants.

Document 3 : Épidémiologie et pollution de l'air
Dans ce document, on peut voir le pourcentage de maladies liées à la pollution de l'air. De nombreuses maladies respiratoires sévères peuvent engendrer des décès. On peut également remarquer que l'augmentation de la quantité d'ozone dans l'air induit directement le nombre d'admissions dans les hôpitaux pour des problèmes respiratoires.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le graphique de droite met en évidence une corrélation entre quantité d'ozone dans l'atmosphère et admissions à l'hôpital, mais ne suffit pas à prouver une causalité. Cette dernière peut, quant à elle, être discutée grâce au document 4. Ce travail entre corrélation et causalité peut être mené grâce à la fiche méthode adéquate : LLS.fr/ESTP274

Document 4 : Effet de la pollution de l'air sur le corps humain
Ce document permet de lister les effets de la pollution sur le corps humain. Les mécanismes impliqués ne sont pas précisés, le but étant simplement ici de montrer que de très nombreux organes et d'importantes fonctions du corps humain peuvent être touchés.

Réponses attendues aux questions :

1. Le chauffage d'une habitation brûle l'équivalent de 10 kg de charbon, ce qui correspond à une énergie libérée de 210 MJ et une masse de CO_2 libérée de 36, 65 kg.
Un trajet de 100 km consommant 6, 25 L de diesel libère une énergie de 238 MJ et une masse de CO_2 de 15,97 kg.
En effet : $m(\mathrm{CO_2}) = 16 \times n(\mathrm{CO_2}) \times M(\mathrm{CO_2})$
On en déduit donc que la masse de CO_2 rejetée par unité d'énergie est de :
- 174,5 g/MJ pour le charbon ;
- 67,1 g/MJ pour le diesel.

2. On s'aperçoit que l'augmentation de la quantité d'ozone au Canada a entraîné une augmentation du nombre d'hospitalisations. Cela suggère que la présence de gaz polluant a un impact direct sur la santé.
On estime à 7 millions le nombre de décès liés à la pollution dans le monde. Ces décès sont souvent liés à des problèmes respiratoires ou pulmonaires, mais de nombreuses pathologies concernent également le cœur ou encore le cerveau.

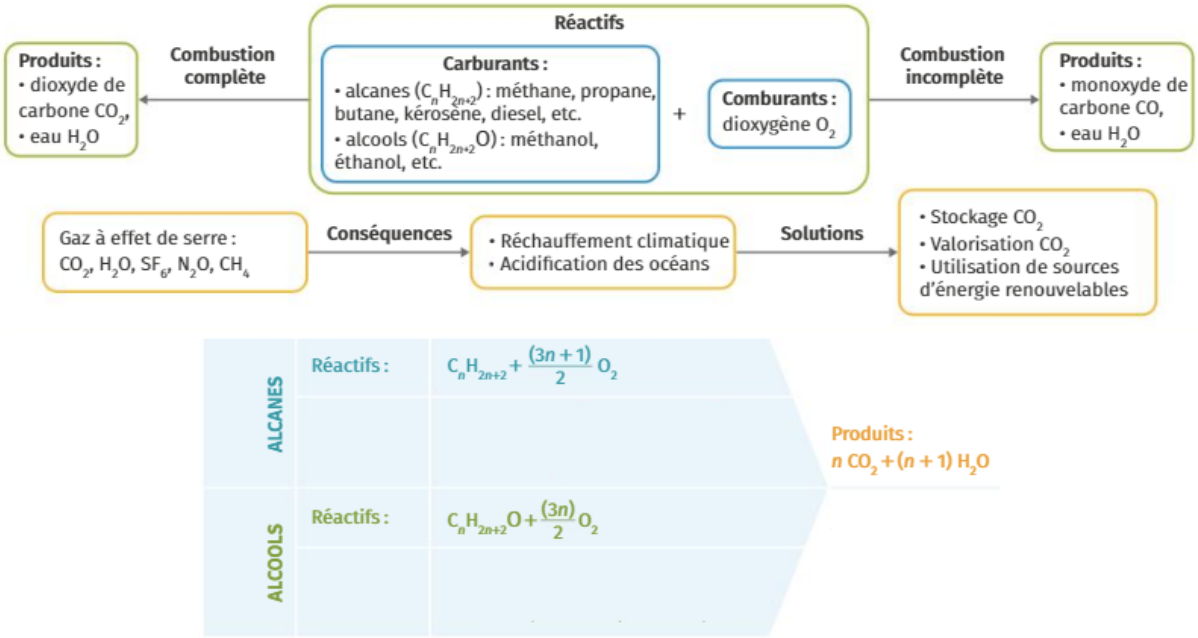
3. Il existe de nombreux gaz polluants tels que l'ozone, le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre ou bien le protoxyde d'azote. Ces gaz peuvent être issus de différents secteurs utilisant des combustions, notamment l'industrie ou les transports.
Certains phénomènes météorologiques, comme le vent ou une température élevée, peuvent augmenter la présence de polluants dans l'air.

Ressources complémentaires :
- La liste des pouvoirs calorifiques présente sur ce site permet de calculer les rejets de CO_2, quel que soit le combustible choisi de la liste : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique :

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Un schéma-bilan sur la combustion :

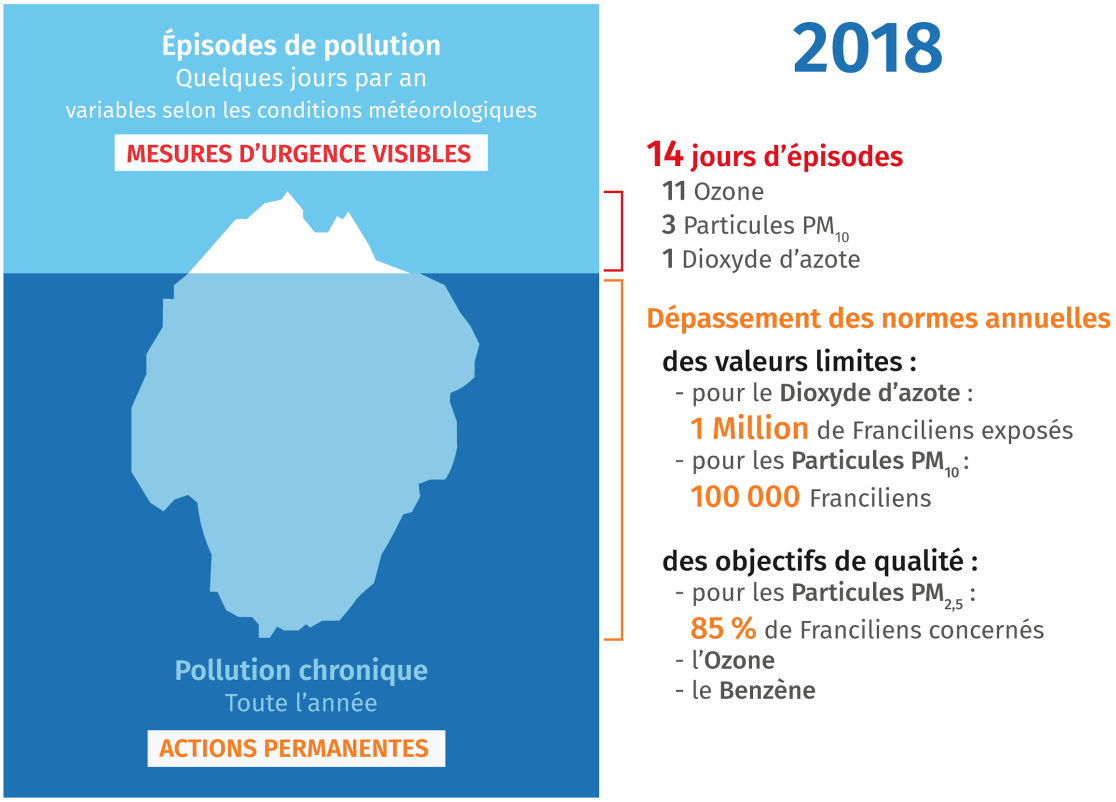
La combustion



- Un outil permettant de comparer de manière écologique les différentes dépenses énergétiques : https://www.boostheat.fr/guide/classe-ges/.
- L'émission « C'est pas sorcier » sur le bilan carbone : https://www.youtube.com/watch?v=OxLZ-LVJ02Y.
- Le site airparif permet d'avoir des données précises et actuelle sur la qualité de l'air en Île-de-France : https://www.airparif.asso.fr/.
- Ressources de l'Organisation mondiale de la santé sur la pollution de l'air : https://www.who.int/topics/air_pollution/fr/.
- Étude sur l'impact économique et sanitaire de la pollution française : https://presse.inserm.fr/pollution-atmospherique-en-france-un-impact-sur-la-sante-du-foetus-et-un-cout-de-1-2-milliards-deuros-pour-la-societe/31319/.
- Un excellent jeu sérieux sur les effets de la pollution de l'air : https://www.airducation.eu/parcours-jeunes

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Infographie sur un épisode de pollution à Paris :



PM_{10} : diamètre $< 10\ \mu m$ (poussières, pollens, moisissures, etc.)
$PM_{2,5}$: diamètre $< 2,5\ \mu m$ (métaux, particules de combustion, composés organiques, etc.)

Source : Airparif

Document sous licence libre Creative Commons

Activité de groupe 5 : Transition écologique et analyse des risques (p. 74-75)

Cette activité a pour but de faire travailler les élèves par groupe sur leur capacité à évaluer des risques dans différentes situations liées à des problèmes écologiques réels. Dans un deuxième temps, chaque groupe devra proposer des préventions efficaces en réponse aux risques.

Lien avec le programme :
La dernière partie du 1.4 « Énergie, choix de développement et futur climatique » est traitée dans cette activité.

Objectifs notionnels :

- Les scénarios de transition écologique font différentes hypothèses sur la quantité de GES émise dans le futur. Ils évaluent les changements prévisibles, affectant les écosystèmes et les conditions de vie des êtres humains, principalement les plus fragiles.
- Les projections fournies par les modèles permettent de définir les aléas et peuvent orienter les prises de décision. Les mesures d'adaptation découlent d'une analyse des risques et des options pour y faire face.

Objectifs méthodologiques :

- Analyser l'impact de l'augmentation du CO_2 sur le développement de la végétation (pour cet item, voir plutôt le chapitre 2).
- Analyser des extraits de documents du GIEC ou d'accords internationaux proposant différents scénarios.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Évaluation des risques, prévention et transition écologique
Ce document commun à tous les groupes permet d'évaluer les risques associés à une situation en utilisant des les notions d'aléa et de vulnérabilité. Il évoque aussi des leviers de réduction de ces risques à travers des préventions et des prévisions.

Groupe 1 : Des risques sanitaires

Présentation des documents

Document 2 : Épisodes caniculaires meurtriers
Ces graphiques permettent de voir la répétition des épisodes caniculaires, ainsi que leurs conséquences sanitaires répétées lors des 20 dernières années, en termes de mortalité.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Une vulnérabilité inégale face au changement climatique
Ce document montre que les populations les plus défavorisées sont également celles qui sont le plus touchées par le réchauffement climatique.

Groupe 2 : Des risques pour les écosystèmes

Présentation des documents

Document 4 : Réchauffement climatique et risque d'incendie en Australie
Ce document évoque les conséquences du réchauffement climatique sur les écosystèmes. Les données fournies peuvent être mises à jour avec les derniers relevés réalisés sur des incendies plus récents.

Document 5 : Capacités de déplacement des espèces
On peut voir quelles sont les espèces les plus vulnérables aux changements climatiques à partir de leur capacité de déplacements.

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. **Avoir identifié la population vulnérable dans chaque exemple.**
Selon le document 2, les personnes les plus vulnérables au risque de canicule sont les personnes âgées ou malades. Dans le document 3 en revanche, les personnes les plus vulnérables au risque d'inondation sont les populations défavorisées, que ce soit au Bangladesh ou au Honduras. Une différence entre les deux pays est cependant observable, ce qui suggère que les habitants du Bangladesh pourraient être de fait plus vulnérables (population plus pauvre, moins d'infrastructures adaptées, etc.) ou que l'aléa y est plus important.

2. **Avoir caractérisé les aléas et leur évolution dans le temps**
L'aléa associé aux épisodes caniculaires est corrélé à la température. Dans un contexte de réchauffement et de dérèglement climatique, ces épisodes sont amenés à être plus fréquents. Ainsi, le document 2 montre que la probabilité de survenue d'une canicule importante en France devrait passer de 10 % en 2040-2059 à 70 % en 2090-2099.

L'aléa associé aux inondations est quant à lui corrélé au niveau marin et aux précipitations, qui sont également dépendants du réchauffement et du dérèglement climatique. Cet aléa pourrait donc aussi être exacerbé à l'avenir.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

3. Avoir proposé des pistes de préventions ou d'atténuation adaptées aux risques encourus.

Quelques pistes de réduction des risques liés aux épisodes caniculaires sont :

- sensibilisation des personnes les plus vulnérables ;
- adaptation des villes avec des infrastructures permettant de limiter la chaleur (résilience) ;
- mesures de fond pour limiter le réchauffement climatique et ainsi réduire l'aléa.

Quelques pistes de réduction des risques liés aux inondations sont :

- formation et préparation des personnes les plus vulnérables ;
- adaptation des villes avec des infrastructures permettant d'évacuer l'excès d'eau (égouts) ou de retenir les vagues ou la montée des eaux (digues) ;
- mesures de fond pour limiter le réchauffement climatique et ainsi réduire l'aléa.

Groupe 2 :

1. Avoir identifié la population vulnérable dans chaque exemple.

Face au risque d'incendie, toutes les populations animales, végétales, fongiques (champignons) ou même bactériennes sont vulnérables. L'exemple des koalas est cité dans le document 4 mais une large biodiversité est en réalité menacée ici.

Le document 5 permet par ailleurs de comprendre que plus les capacités de déplacement des espèces sont limités, plus cela les rend sensibles au réchauffement climatiques. Ainsi, les populations les plus sédentaires sont ici les plus vulnérables : les arbres, les autres plantes et dans une moindre mesure les primates et les rongeurs.

2. Avoir caractérisé les aléas et leur évolution dans le temps

Le réchauffement climatique ne cesse d'augmenter depuis quelques décennies et entraîne une croissance des épisodes caniculaires ou des incendies. l'aléa associé à la survenue de ces incendies est donc croissant chaque année.

Pour ce qui est du déplacement des espèces, il s'agit ici de la vitesse de réchauffement climatique, variable selon les différents scénarios.

3. Avoir proposé des pistes de préventions ou d'atténuation adaptées aux risques encourus.

Les mesures de transition écologique permettant d'engager la trajectoire des humains sur le scénario RCP 2,6 plutôt que sur le scénario RCP 8,5 auront un impact direct sur la survie de la biodiversité, comme on peut le voir dans le document 5. Si des possibilités d'aide au déplacement d'espèces (par transferts d'individus ou corridors écologiques) par les humains sont envisagées, elles ne seront pas aussi efficace que des mesures globales de lutte contre le changement climatique.

Quant aux incendies, outre la limitation du réchauffement climatique (de nouveau), il s'agit de disposer de ressources (humaines notamment, avec les pompiers) permettant de localiser et d'éteindre le plus rapidement possible les feux de forêts, de sensibiliser les populations aux bon gestes évitant les départs de feux.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

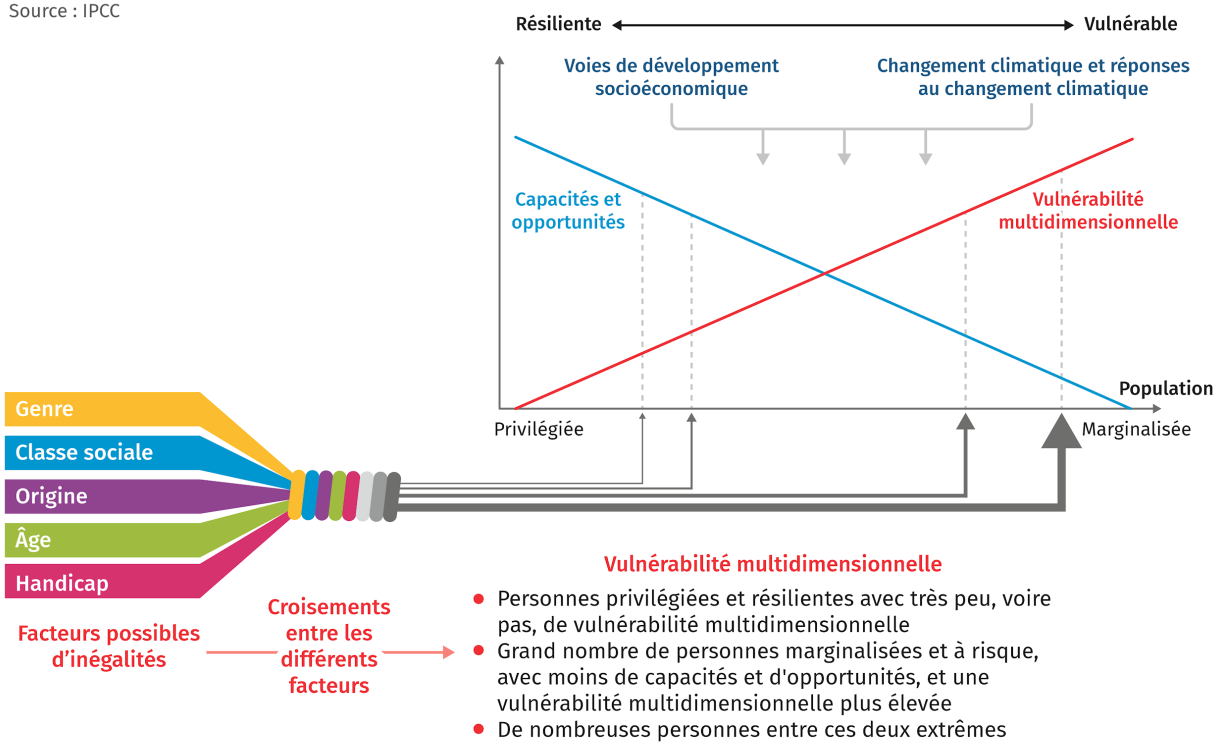
Ressources complémentaires :

- Analyse et description des risques en fonction des aléas et de la vulnérabilité. Cette page fournit des exemples et permet de mieux comprendre l'analyse d'un risque : https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/FEL2017.xml.
- Un reportage de France 3 sur l'accélération des épisodes caniculaires et leur prévision. On y voit également les conséquences de ces épisodes et les espèces vulnérables : https://www.youtube.com/watch?v=vFB9iSt_2xU.
- Ressources complètes de Météo France. On y retrouve des données chiffrées, mais aussi des explications et des vidéos sur les épisodes méditerranéens. Ce phénomène s'accentue avec le réchauffement climatique. On peut donc mener une analyse des risques climatiques sur des régions françaises :
- http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-episodes-mediterraneens.
- Vidéo du *Monde* expliquant les possibles causes des incendies en Australie à partir de travaux scientifiques chiffrés sur le dérèglement climatique : https://www.youtube.com/watch?v=5-QdJmUbxWw.
- Étude scientifique sur les risques d'incendie en Amazonie et sur la déforestation constante :
- https://www.geo.fr/environnement/amazonie-la-deforestation-est-la-cause-principale-des-incendies-selon-un-chercheur-197119
- Base de données sur les incendies en France : https://www.promethee.com/incendies.
- Une étude sur les risques d'incendie et sur les préventions adaptées à ces risques : https://atlasclimatique.ca/les-incendies-de-foret-et-le-changement-climatique.
- Vidéo expliquant les raisons et les conséquences de l'acidification des océans : https://www.youtube.com/watch?v=QA-tldY0qOQ
- https://ocean-climate.org/ : ce site regroupe de nombreuses explications et données scientifiques de l'impact du climat sur l'océan.
- Vidéo réalisée par l'institut océanographique qui explique très bien les risques et les prévisions autour de l'acidification des océans : https://player.vimeo.com/video/236558003.
- https://www.micheau.fr/2018/03/28/huile-de-palme-deforestation-de-borneo/ : ce site permet de travailler sur la déforestation liée à l'exploitation de l'huile de palme et sur ses conséquences sur les populations et sur l'écosystème de Bornéo.
- Article complet permettant de travailler les risques issus de la canicule, mais aussi d'y associer une protection, avec notamment l'utilisation de revêtements anti-chaleur : https://www.bfmtv.com/planete/paris-etudie-les-ilots-de-chaleur-pour-mieux-faire-face-a-la-canicule-1219002.html.
- Ressources sur les différences de vulnérabilité des populations face au changement climatique : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap13_FINAL.pdf

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Figure du GIEC sur les différences de vulnérabilité :

Source : IPCC

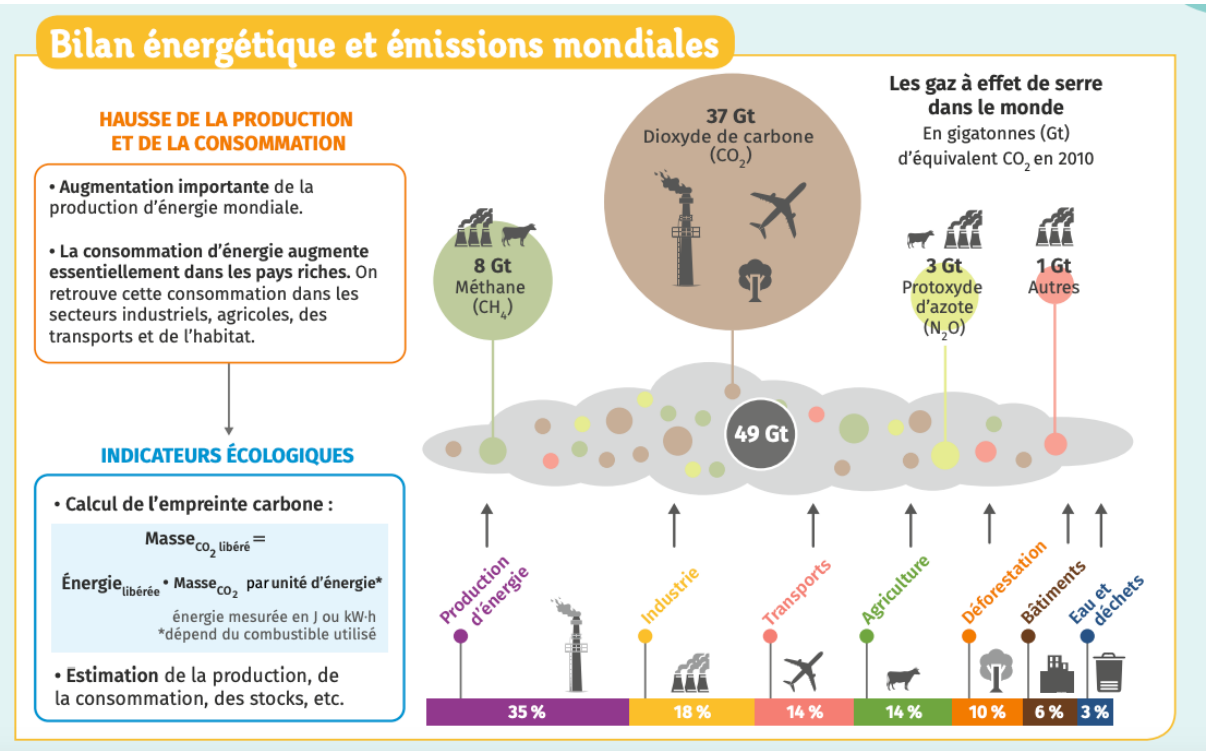


Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 77)

Le futur climatique dépend de nos choix de consommation. En effet, l'augmentation de la production industrielle, ainsi que l'usage croissant des transports, entraînent l'émission d'une quantité croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On note aussi la présence de gaz polluants qui engendrent des maladies respiratoires.

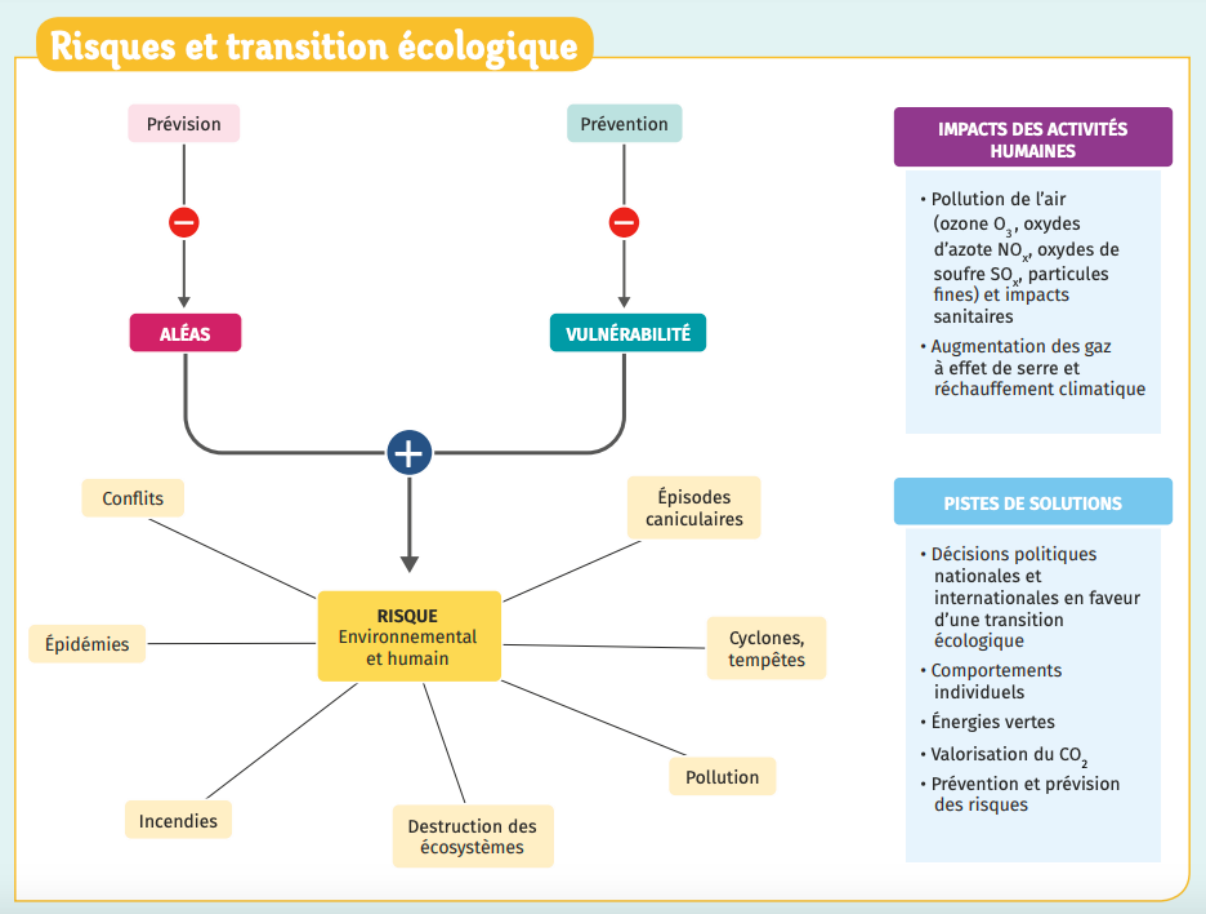
On retrouve ces éléments dans l'infographie chiffrée suivante :



Source : https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/3/c/a/3cada881f3_80831_ges.jpg

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

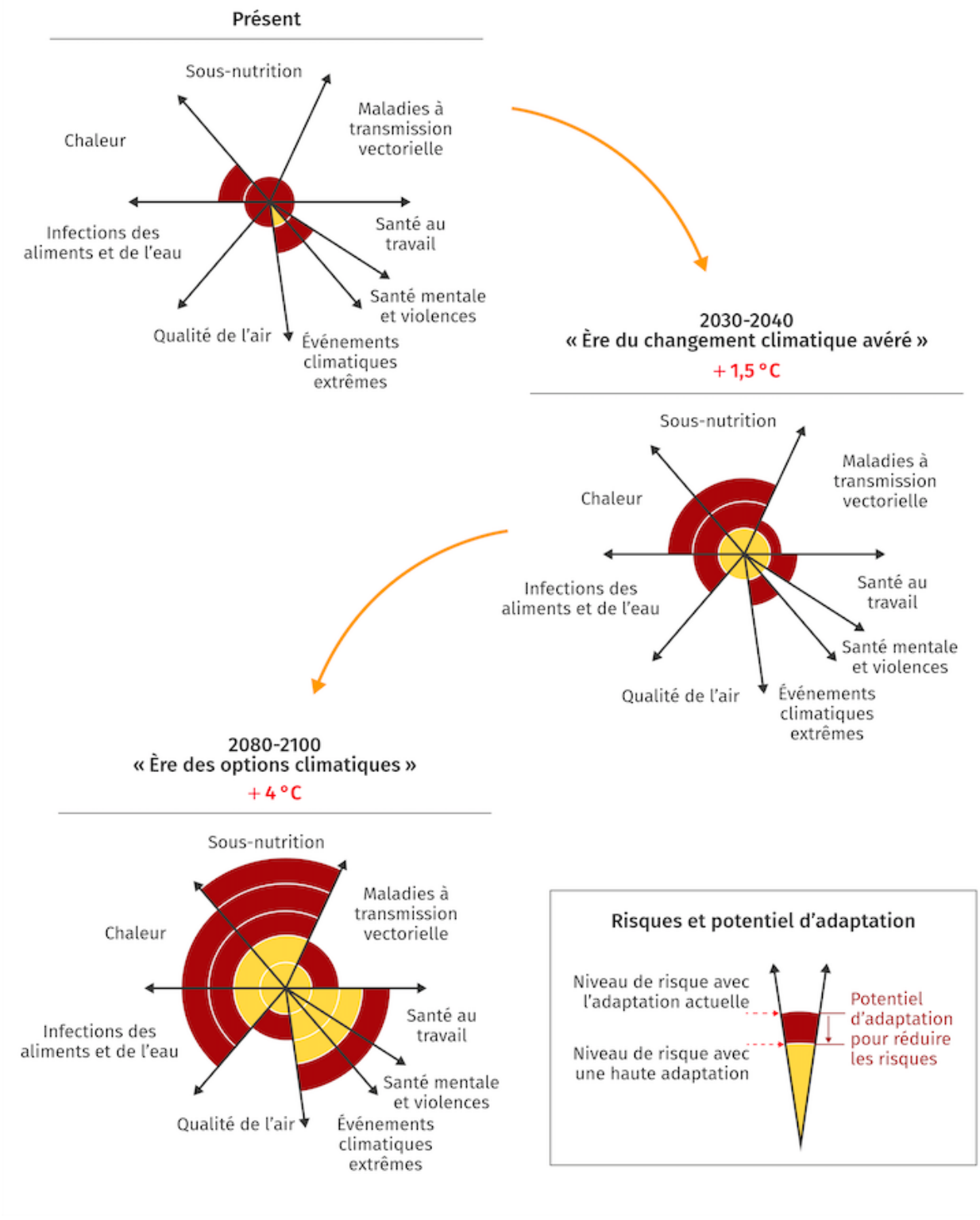
Pour réduire ces effets, il faut donc changer notre mode de vie. Mais il nous faut également des outils nous permettant de comparer et guider nos choix. L'empreinte carbone est un outil performant, car il nous donne la pollution de CO_2 émise par un objet en prenant en compte un maximum de paramètres de son cycle de vie.



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

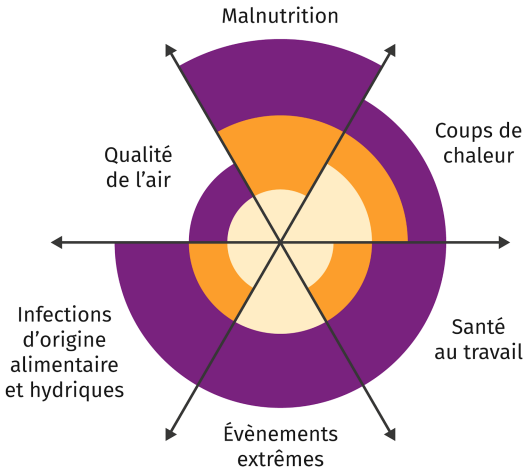
Ressource complémentaire :

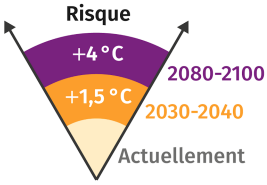
Les risques liés au réchauffement climatique sont nombreux, on peut noter :



Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Une version simplifiée et plus accessible aux élèves est proposée ici :





Les prévisions qui sont faites permettent de limiter les risques, car on peut désormais entreprendre des préventions adéquates.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 78)

1. Parmi les propositions suivantes, laquelle représente un flux d'énergie ?
b. Le photovoltaïque.

2. L'empreinte carbone d'un objet représente :
c. le dioxyde de carbone émis lors du cycle de vie de cet objet.

3. Laquelle de ces énergies est la plus grande ?
b. 3, 0 t.e.p.

4. Parmi les gaz suivants, lequel n'est pas un gaz à effet de serre ?
a. Le diazote N_2.

5. Lequel de ces gaz est un gaz polluant dangereux pour la santé ?
c. L'ozone O_3

6. Laquelle de ces énergies n'est pas une énergie fossile ?
a. La biomasse

7. Quelle proposition n'est pas une conséquence du réchauffement climatique ?
a. Le développement des forêts.

8. L'appareil électrique a une consommation énergétique par minute de :
a. 60 000 J.

9. Un risque est le produit de :
c. la vulnérabilité et l'aléa.

10. Justifier cette phrase du chercheur François-Marie Bréon, au sujet de la canicule de l'été 2018 en France : « Des étés de ce type-là vont devenir la norme ».
La répétition des périodes caniculaires ces dernières années, due au réchauffement climatique, montre qu'il ne s'agit plus d'un phénomène rare, mais que ces épisodes deviennent de plus en plus fréquents. L'absence de mesures de fond à l'échelle internationale pour limiter le réchauffement climatique augmente chaque année l'aléa relatif à la survenue des tels épisodes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 79)

11. Des sources d'énergie différentes

Compétence principalement travaillée : Calculer la masse de CO_2 produite par unité d'énergie dégagée pour différents combustibles

Correction :

1. On appelle « énergie fossile » une énergie produite à partir de matières riches en carbone (hydrocarbures). Parmi les propositions, on trouve le charbon et le pétrole.

2.

Stock d'énergie	Flux d'énergie
- Charbon - Nucléaire (stock d'uranium) - Pétrole	- Éolien - Hydraulique - Photovoltaïque

3. En sachant que $1\ \mathrm{kW.h} = 3,6 \times 10^6$ J, on trouve, dans le cas de l'énergie nucléaire, que 4 g de CO_2 par kW.h correspond à $3,6 \times 10^6 \times 4 = 14,4 \times 10^6$ g/J.

Autres résultats :

Source d'énergie	Rejet de CO_2 (en $g \cdot J^{-1}$)
Nucléaire	$14,4 \times 10^6$
Photovoltaïque	$201,6 \times 10^6$
Charbon	$1\ 260 \times 10^6$
Hydraulique	$14,4 \times 10^6$
Éolien	$36,0 \times 10^6$
Pétrole	954×10^6

4. Pour une quantité d'énergie produite identique, on s'aperçoit que les énergies nucléaire et hydraulique sont les moins polluantes (en terme de rejet de CO_2), puis viennent l'éolien et le photovoltaïque. Bien après, on retrouve le pétrole comme énergie très polluante et le charbon. Les stocks d'énergies fossiles sont de loin les énergies les plus polluantes. On peut donc se questionner sur ce type de consommation à l'usage dans le temps limité, mais aux conséquences climatiques importantes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Calculer la masse de CO_2 produite par unité d'énergie dégagée pour différents combustibles

1. Classer ces sources d'énergies par ordre de pollution croissante pour une même quantité d'énergie produite. Discuter.
Pour une même quantité d'énergie, on trouve par ordre de pollution croissante :

En sachant que $1\ \mathrm{kW.h} = 3,6 \times 10^6$ J, on trouve, dans le cas de l'énergie nucléaire que 4 g de CO_2 par kW.h correspond à $3,6 \times 10^6 \times 4 = 14,4 \times 10^6$ g/J.

Autres résultats :

Source d'énergie	Rejet de CO_2 (g/J)
Nucléaire	$14,4 \times 10^6$
Hydraulique	$14,4 \times 10^6$
Éolien	$36,0 \times 10^6$
Photovoltaïque	$201,6 \times 10^6$
Pétrole	954×10^6
Charbon	$1\ 260 \times 10^6$

On s'aperçoit que les énergies fossiles sont les plus polluantes pour l'environnement.

2. Classer, pour une même masse, la quantité d'énergie libérée pour ces énergies fossiles.
Pour une masse identique, on s'aperçoit que le pétrole libère plus d'énergie que le charbon. Ces énergies restent cependant négligeables comparées au nucléaire.
Le charbon produit 9,47 kWh/kg, et donc une énergie équivalente à :
$E_{charbon} = 9,47 \times 3,6 \times 10^6 = 3,41 \times 10^7 J = 34,1$ MJ
Le nucléaire libère 72,6 GJ pour 1 g d'uranium. Pour 1 kg, il libère donc 72,6 TJ.

Source d'énergie	Nucléaire	Charbon	Pétrole
Énergie pour 1 kg	72,6 TJ	34,1 MJ	46,7 MJ

3. Calculer la quantité de CO_2 libérée par 4 kg de chaque source d'énergie.
4 kg de charbon a une énergie de : $4 \times 34,1 = 136$ MJ

Source d'énergie	Nucléaire	Charbon	Pétrole
Énergie	290 TJ	136 MJ	187 MJ

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Suggestion de question supplémentaire :
Il est possible d'effectuer la même démarche en ajoutant d'autres sources d'énergie. Le gaz rejette 200 g de CO_2 par kW·h d'énergie libérée, et il libère 1,02 mt.e.p par kilogramme.
On trouvera de la même manière qu'il libère 42,7 MJ par kg de gaz brulé.
AN : $E_{gaz} = 1,02 \times 10^{-3} \times 4,19 \times 10^{10} = 4,27 \times 10^{7} J = 42,7$ MJ
De la même manière on trouve une énergie de 171 MJ pour 4 kg de gaz brûlé.

12. La pollution dans l'habitat

Compétence principalement travaillée : Identifier et expliquer les conséquences sur la santé de certains polluants atmosphériques

Correction :

1. La qualité de l'air respiré a un impact direct sur notre santé. En effet, la pollution de l'air peut entraîner une dégradation de la fonction pulmonaire, mais également des troubles cognitifs et cardiaques. Cela peut aussi avoir des effets sur le système reproductif et la grossesse.

2. Il est important de prêter attention au matériaux de fabrication de l'habitat, mais également d'assurer l'entretien de ce dernier pour éviter le développement de moisissures. Cependant, l'entretien doit, dans le mesure du possible, se faire avec des produits n'affectant pas la qualité de l'air.
Au-delà du choix de consommation, il est important d'aérer régulièrement l'habitat afin d'éviter l'accumulation de pollution, mais aussi d'éviter autant que possible l'utilisation de polluants (tabac ou combustions) à l'intérieur d'une habitation.

13. L'empreinte carbone de différents trajets

Compétence principalement travaillée : Calculer la masse de CO_2 produite par unité d'énergie dégagée pour différents combustibles

Correction :

1. L'empreinte carbone d'un A380 pour un trajet de 100 km est de 8,46 tonnes, alors que celui d'une voiture pour ce même trajet est de 15,2 kg.

2. Si on ramène l'empreinte carbone au nombre de passagers dans chaque transport, on trouve que le trajet en avion émet 9,92 kg de CO_2 par passager, contre un rejet compris entre 15,2 kg et 3,04 kg de CO_2 par passager pour un trajet en voiture (pour respectivement 1 et 5 personnes présentes dans la voiture).

3. On voit clairement, à partir des valeurs précédentes, que le taux de remplissage d'une voiture est un facteur important pour réduire les émissions de CO_2 par personne lors d'un même trajet.
Le covoiturage est une solution écologique non négligeable, car elle permet de réduire significativement les rejets de CO_2 lors d'un trajet. En effet, avec un taux de remplissage moyen de 1,4 personne par déplacement, la voiture est plus polluante que l'avion. Le covoiturage est donc une alternative écologique simple et efficace.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 80-81)

14. Prime à la conversion et empreinte carbone

Compétence principalement travaillée : Raisonner en utilisant une empreinte carbone

Correction :

1. Pour que cet achat puisse être écologique, il faut prendre en compte les rejets de CO_2 que génère la fabrication de cette voiture, en plus des rejets de CO_2 pour chaque kilomètre parcouru.
Une voiture ancienne produit 176 g de CO_2 pour chaque kilomètre parcouru.
L'achat d'une voiture neuve entraîne 8,5 tonnes de CO_2 pour la fabrication, ainsi que 116 g de CO_2 par kilomètre parcouru.
En notant *x* le nombre de kilomètres parcourus, on peut écrire l'égalité des rejets de CO_2 :
$176 \times x = 8,5 \times 10^6 + 116 \times x$.
Soit $x = \dfrac{8,5 \times 10^6}{176 - 116} = 141\ 667$ km
On s'aperçoit que l'achat d'une nouvelle voiture est écologique si on dépasse les 42×10^3 kilomètres parcourus.

2. Il faut également prendre en compte d'autres paramètres, comme le recyclage de l'ancienne voiture, mais également le type de carburant utilisé, car sa combustion ne produit pas uniquement du CO_2 mais d'autres composants polluants, tels que les particules fines.

15. Différents régimes alimentaires et leurs impacts environnementaux

Compétence principalement travaillée : Raisonner en utilisant une empreinte carbone

Correction :

1. En comparant les différentes valeurs du document 2, on peut noter que remplacer la consommation de bœuf par des végétaux permet de :
- réduire de 90,1 % la surface des terres cultivées ;
- réduire de 96,3 % les émissions de CO_2 ;
- réduire de 94,2 % l'apport d'engrais azotés.

La transition alimentaire de la consommation de bœuf à celle de végétaux présente de nombreux avantages écologiques.

2. Les résultats précédents, ainsi que les informations présentes dans le document 1, montrent que plus une alimentation s'affranchit d'aliments d'origine animale, plus les réductions d'émissions de CO_2 sont importantes. Sachant que l'augmentation des gaz à effet de serre a un impact direct sur le réchauffement climatique, on peut déduire que le choix d'un régime alimentaire est un facteur écologique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

16. Production agricole mondiale et démographie

Compétence principalement travaillée : Analyser des extraits de documents proposant différents scénarios

Correction :

1. Les populations vulnérables sont celles qui souffrent actuellement de famine mais également de sous-nutrition.

2. Un humain a besoin d'environ 200 kg d'équivalent céréales par an. À l'horizon 2100, on estime à 11 milliards la population mondiale, ce qui nécessite 2 200 milliards de kilogrammes d'équivalent céréales pour nourrir l'humanité. Aujourd'hui, la demande est de 1 540 milliards de kilogrammes d'équivalent céréales.
En conservant le mode de consommation actuel, les risques de famines sont très importants sans une augmentation importante de la production alimentaire et/ou une réduction massive du gaspillage à l'échelle mondiale.

3. En prenant en compte le gaspillage alimentaire, nous produisons aujourd'hui 1 667 milliards de kilogrammes d'équivalent céréales, ce qui permet de subvenir aux besoins actuels, mais pas aux besoins futurs. Cependant, si nous réduisons le gaspillage alimentaire à zéro, la production s'élève à 2 500 milliards de kilogrammes d'équivalents céréales et ceci nous permettrait de subvenir largement aux besoins futurs.
Plutôt que d'augmenter la production mondiale agricole qui nécessite des surfaces d'exploitation plus importantes et génère de la pollution, il est préférable de réduire le gaspillage. En réduisant le gaspillage à 12 %, la production atteindrait l'équilibre pour nos besoins futurs.

17. Diagnostic de performance énergétique

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles

Correction :

1. Pour le logement n°1: $L1 = \frac{4960}{40} = 124$ kWh·m^{-2}·an^{-1}

Pour le logement n°2 : $L2 = \frac{(34,6 \times 10^9 \times 2,78 \times 10^{-7})}{40} = 240$ kWh·m^{-2}·an^{-1}

Pour le logement n°3 : $L3 = \frac{(23\ 200 \times 10^6 \times 2,78 \times 10^{-7})}{20} = 322$ kWhÍm^{-2}·an^{-1}

Pour le logement n°4 : $L4 = \frac{(18,1 \times 10^3)}{110} = 165$ kWh·m^{-2}·an^{-1}

On en déduit donc le diagnostic suivant pour les logements :
- logement n°1 : C ;
- logement n°2 : E ;
- logement n°3 : E ;
- logement n°4 : D ;

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Pour le logement n°1 : $L1 = 4\ 960 \times 237,0 = 1\ 175,5$ kg·an^{-1}
Pour le logement n°2 : $L2 = 34,6 \times 10^9 \times 2,78 \times 10^{-7} \times 93,50 = 899,4$ kg·an^{-1}

3. À l'aide des résultats précédents, on s'aperçoit que le diagnostic de performance énergétique rend compte de la quantité d'énergie utilisée pour chauffer un logement, mais ne prend pas en compte la quantité de CO_2 rejeté. On voit par exemple que le diagnostic du logement n°2 est bien moins bon que celui du logement n°1, alors qu'il rejette moins de dioxyde de carbone.
Le diagnostic de performance énergétique a donc uniquement un intérêt économique et non écologique.

Suggestion de questions supplémentaires :

4. Déterminer l'impact écologique de l'isolation de l'habitat.
Quel que soit le type de chauffage utilisé, celui-ci rejette une quantité de CO_2 pour chaque kWh d'énergie produite. Si on augmente l'isolation d'un habitat, on diminue donc sa consommation, mais également ses rejets de CO_2 dans l'atmosphère. Il y a donc un avantage écologique et économique.

5. Proposer un diagnostic de performance écologique.
On peut remplacer le diagnostic de performance énergétique par un diagnostic de performance écologique. Celui-ci serait basé sur la quantité de CO_2 rejetée par mètre carré et par an, plutôt que sur la quantité d'énergie utilisée. Le choix d'un habitat, mais également des autres appareils utilisant ce système, se ferait sur une base écologique et non économique.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles

1. Déterminer l'énergie libérée par cet appartement en une année.
L'appartement libère 34,6 GJ d'énergie par an.
Sachant qu'un joule équivaut à $2,78 \times 10^{-7}$ kW·h on trouve :
$E_{libérée} = 34,6 \times 10^9 \times 2,78 \times 10^{-7} = 9611$ kW·h d'énergie par an.

2. Quel est le diagnostic de cet appartement ?
Sachant que l'appartement fait 40 m², on en déduit que l'énergie libérée par m² est : $\frac{9611}{40} = 240$ kWh·m^{-2}·an^{-1}. Ainsi, le logement est de catégorie E.

3. Déterminer la quantité de CO_2 dégagée.
En France 1 kW·h d'énergie électrique consommée rejette 93,5 g de CO_2. On en déduit que ce logement rejette $m_{CO_2} = 9611 \times 93.5 = 8,99 \times 10^5 g = 899$ kg de CO_2 par an.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le coin des experts (p. 82)

18. Laitue écologique et valorisation du CO_2

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles

Correction :

1. Une parcelle moyenne de 3,8 ha nécessite environ 190 kg d'urée. Sachant que la quantité de matière d'urée produite est égale à la quantité de CO_2 valorisée (d'après le doc. 2), on en déduit que :

$$\frac{m(\mathrm{CO_2})}{M(\mathrm{CO_2})} = \frac{m(\mathrm{uree})}{M(\mathrm{uree})}$$

$$m(\mathrm{CO_2}) = \frac{190 \times 44}{60} = 139 \text{ kg}$$

Une parcelle moyenne permet de valoriser 139 kg de CO_2.

2. Pour déterminer la part de CO_2 qui peut être valorisée sur le territoire français, il faut d'abord calculer la surface agricole : $\mathrm{S} = 643\ 801 \times 100 \times 0,54 = 34\ 765 \times 10^3$ ha

En utilisant les résultats précédents on trouve : $m = \frac{34,765 \times 10^3 \times 139}{3,8} = 1,27 \times 10^9$ kg

3. On trouve la part de CO_2 valorisée à l'échelle mondiale de :

$r = \frac{1,27 \times 10^9}{36\ 000 \times 10^9} = 3,5 \times 10^{-5}$ soit 0, 003 5 %.

4. Les méthodes d'agriculture qui se développent, comme l'agriculture raisonnée ou biologique, se caractérisent par une utilisation d'engrais chimiques nulle ou peu importante. Ainsi, accroître la production de ces engrais dans le cadre d'une valorisation lors de la synthèse d'engrais ne semble, dans ce contexte, pas pertinent.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles

1. Quelle masse de CO_2 peut-on valoriser sur une parcelle moyenne de laitue en agriculture conventionnelle ?

Une parcelle moyenne de 3, 8 ha nécessite environ 190 kg d'urée. Sachant que la quantité de matière d'urée produite est égale à la quantité de CO_2 valorisée (d'après le doc. 2), on en déduit que :

$$\frac{m(\mathrm{CO_2})}{M(\mathrm{CO_2})} = \frac{m(\mathrm{uree})}{M(\mathrm{uree})}$$

$$m(\mathrm{CO_2}) = \frac{190 \times 44}{60} = 139 \text{ kg}$$

Une parcelle moyenne permet de valoriser 139 kg de CO_2.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

19. L'émission de particules fines et ses conséquences

Compétence principalement travaillée : Identifier et expliquer les conséquences sur la santé de certains polluants atmosphériques tels que les particules fines résultant de combustions

Correction :

1. Les risques liés aux particules fines sont des complications médicales pour les personnes vulnérables, telles que les personnes âgées, les enfants ou les personnes malades. Les particules fines favorisent par exemple les infections respiratoires pouvant entraîner la mort.

2. Il existe différents moyens de se protéger de ces particules fines. Une grande part de ces particules proviennent de l'habitat, il faut donc au maximum aérer les pièces d'une maison. Il convient aussi de faire attention aux modes de consommation.
On peut, à plus grande échelle, limiter les facteurs émettant des particules fines, comme le transport avec des véhicules polluants. On peut remplacer ces modes de transports par des transports plus écologiques, ou encore revoir les méthodes de recyclage dans certains pays où l'incinération des déchets provoque une augmentation importante des particules fines dans l'air.
Pour finir, il est important d'améliorer les prévisions météorologiques, afin d'anticiper au maximum les tempêtes de sable dans certains pays et améliorer la communication liée aux préventions auprès des populations.

3. Après de nombreux pics de pollution répétés dans de nombreuses métropoles du monde ces dernières années, on peut penser que les problèmes de santé liés aux particules fines vont diminuer dans le futur, car ces émissions ont diminué de moitié en moins de 30 ans. Il faut encore travailler dans ce sens, notamment dans nos habitations et nos transports, mais la dynamique actuelle est plutôt encourageante.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Chapitre 5 : Deux siècles d'énergie électrique

Présentation **2**

Activités **5**

Activité documentaire 1 : La production d'électricité (p. 100-101) 5
Activité documentaire 2 : Fonctionnement et rendement d'un alternateur (p. 102) 9
Activité documentaire 3 : Étude d'une cellule photovoltaïque (p. 103) 11
Activité numérique : Étude d'une cellule photovoltaïque en version expérimentale 15
Activité documentaire 4 : Le capteur photovoltaïque (p. 104-105) 18

Bilan (p. 107) **20**

Exercices **21**

Zone d'échauffement (p. 108) 21
L'atelier des apprentis (p. 109) 23
Le repaire des initiés (p. 110-111) 25
Le coin des experts (p. 112) 29

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Le chapitre 5 propose dans un premier temps une approche historique du développement des concepts clés de l'électromagnétisme à l'origine des générateurs d'électricité. En effet, les expériences historiques réalisées au début du XXIe siècle par le danois Hans Christian Ørsted et l'anglais Michael Faraday posent les bases du développement de l'électromagnétisme et de son formalisme quelques décennies plus tard par James Clerk Maxwell. Le phénomène d'induction, mis en évidence par Faraday, est au centre du principe de l'alternateur, dispositif utilisé dans la majeure partie des installations produisant de l'électricité de nos jours. Devant les enjeux environnementaux de notre époque, produire de l'électricité sans contribuer au réchauffement climatique est un objectif majeur de la transition climatique et environnementale. C'est dans cet esprit que le chapitre propose une étude des capteurs photovoltaïques et de leurs composants fondamentaux : les semi-conducteurs. Le défi majeur étant de pouvoir construire des cellules photovoltaïques dont le rendement est suffisamment important pour pouvoir être compétitif face à d'autres moyens de production d'électricité, tels que les centrales nucléaires par exemple.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Le spectre électromagnétique et la longueur d'onde : les élèves ont appris que la lumière n'est qu'un cas particulier d'un phénomène plus général que l'on appelle les ondes électromagnétiques. Celles-ci sont caractérisées par une grandeur appelée longueur d'onde. Les valeurs que peut prendre cette longueur d'onde permettent de « classer » les ondes électromagnétiques dans différentes catégories ou domaines (rayons X, gamma, visible, IR, UV, ondes radios, etc.). En suivant ce critère, les élèves ont pu voir que les valeurs des longueurs d'onde de la lumière visible s'étendent de 400 nm à 800 nm.
- Les élèves ont également appris à caractériser les différents spectres d'émission : d'une part, les spectres continus d'origine thermique et émis par un corps à une température donnée ; d'autre part, les spectres de raies émis par un gaz chauffé. Pour ce dernier point, le spectre de raies d'un gaz ne contenant qu'un seul élément chimique constitue une carte d'identité de cet élément. Par l'analyse d'un spectre d'émission de raies d'un gaz chauffé, on peut identifier la présence de certains éléments chimiques (voir le spectre des étoiles).

Ce qui a été enseigné en première :

- La partie 2 du programme d'Enseignement scientifique, intitulée « Le Soleil, notre source d'énergie ». a été l'occasion d'approfondir l'étude du rayonnement solaire et de son impact sur la Terre en travaillant les notions suivantes :
    - spectre du rayonnement émis à la surface du Soleil en utilisant le modèle du corps noir ;
    - relation entre la longueur d'onde du rayonnement d'intensité maximale et la température absolue de surface (loi de Wien) ;
    - analyse du spectre d'émission du Soleil ;
    - étude de la puissance émise et radiative reçue par le Soleil ;
    - bilan radiatif terrestre, en tenant compte de la courbe d'absorption de l'atmosphère terrestre.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'objectif général étant la compréhension de la relation entre le rayonnement solaire, sa nature et ses caractéristiques, et le bilan énergétique terrestre.

- Exploiter la caractéristique d'un dipôle électrique : point de fonctionnement, modélisation par une relation $U = f(I)$ ou $I = g(U)$. Les élèves ont appris à exploiter ou construire la caractéristique d'un dipôle. Ils ont pu également travailler les capacités numériques suivantes :
    - représenter un nuage de points associé à la caractéristique d'un dipôle ;
    - modéliser la caractéristique d'un dipôle à l'aide d'un langage de programmation.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :
Le chapitre 6 aborde les avantages et les inconvénients de la production d'électricité sans combustion, c'est l'occasion de remobiliser les connaissances sur l'alternateur et les cellules photovoltaïques ainsi que les rendements de conversion.
Le chapitre 7 évoque le transport de l'électricité et la notion de courant alternatif, déjà introduite dans l'activité 1.

Bibliographie :

- R. Feynman, R. Leighton et M. Sands, *Les cours de physique de Richard Feynman*, Dunod, nouvelle édition 2018 : collection classique qui regorge de petits exemples ou d'interprétations physiques de phénomènes de la vie courante avec un contenu théorique important. À l'usage de l'enseignant uniquement.
- C. Ngô et H. Ngô, *Physique des semi-conducteurs*, Dunod, 1998.
- L. Chancelier, E Laurent, *Électricité photovoltaïque*, Gret, 1996.
- G. Moine, *L'électrification solaire photovoltaïque*, Observ'ER, 2016.

Sitographie :

- Le site de la Royal Society sur Michael Faraday : https://www.rigb.org/our-history/people/f/michael-faraday.
- Une vidéo sur le fonctionnement de l'alternateur : https://youtu.be/0j2uS78H8Qs.
- Des informations sur l'électricité et son histoire, d'Ampère à Maxwell, en passant par Faraday : http://www.ampere.cnrs.fr/?lang=fr.
- L'histoire de l'électricité en 3 vidéos de la BBC (en anglais) : http://www.pearltrees.com/t/lls-ressources-terminale-es/theme-2-le-futur-des-energies/id25533525/item262065770.
- Une vidéo sur l'utilisation de l'électricité : https://youtu.be/O77ZvlwCd.
- Le site du CEA : www.CEA.fr,
  et plus particulièrement le livret sur les énergie du XXIe siècle :
  http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/energies-du-21e-siecle.aspx.

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Caractéristiques d'un alternateurs : à l'aide d'une maquette d'alternateur, montrer les différents paramètres qui influencent son rendement.
- Séance de classe inversée : proposer aux élèves de réaliser une vidéo de 3-4 minutes en *stop motion* (utilisation d'un *smartphone* et d'un logiciel gratuit du type *stop motion studio*) sur l'un des concepts clés du chapitre :
    - le principe de fonctionnement de l'alternateur ;

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- le principe de fonctionnement d'un semi-conducteur ;
- le phénomène d'induction ;
- la cellule photovoltaïque.

Document sous licence libre Creative Commons

Activités

L'enchaînement des activités permet de parcourir 200 ans de production d'énergie électrique. En proposant une approche historique, l'activité 1 permet de comprendre les notions fondamentales et l'origine des phénomènes électromagnétiques utilisés encore de nos jours dans la production d'électricité. Les notions de fonctionnement et de caractéristiques d'un alternateur sont abordées de manière plus approfondies dans l'activité 2. Enfin, devant les défis énergétiques auxquels nous faisons face, les activités 3 et 4 abordent une autre forme de production d'électricité, à savoir, la production d'énergie électrique à partir de l'énergie radiative solaire.

Activité documentaire 1 : La production d'électricité (p. 100-101)

Lien avec le programme :

- Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIXe siècle.

Objectifs notionnels :

- Identifier la source d'un champ magnétique et du mouvement d'un fil conducteur.
- Identifier les conditions expérimentales de la production d'un mouvement à partir d'un champ magnétique.

Objectifs méthodologiques :

- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pas seulement d'information.
- Rechercher des informations pour répondre à une question scientifique.
- Expérimenter pour comprendre un phénomène physique et la relation entre deux grandeurs physiques.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Électricité et magnétisme

Ce document évoque l'expérience historique du danois Hans Christian Ørsted, réalisée en 1820. C'est la première expérience qui confirme une relation entre la circulation d'un courant électrique dans un fil conducteur et l'apparition d'un champ magnétique. Au cours de la même année, il développa ses recherches et montra que le courant électrique circulant dans le fil produit un champ magnétique circulaire.

Document 2 : Michael Faraday à la Royal Institution

En 1821, Michael Faraday réussit à montrer qu'un champ magnétique et un courant électrique peuvent créer un mouvement. Le moteur dans sa forme la plus élémentaire était né. Il est conseillé de consulter l'expérience de Faraday en vidéo sur LLS.fr/ESTP100, ainsi que le site

Document sous licence libre Creative Commons

de la Royal Society. Ces ressources permettent de visualiser toutes les étapes du cheminement intellectuel et expérimental de Michael Faraday.

Document 3 : Faraday et l'induction

En 1831, Michael Faraday va encore plus loin dans l'exploration de la relation entre l'électricité, le magnétisme et le mouvement. Il arrive à créer de l'électricité grâce au mouvement d'un champ magnétique, lui-même produit par un courant électrique. La grande force de son dispositif est que les deux parties ne sont pas reliées physiquement. Le mouvement du premier cylindre induit un courant dans un autre cylindre : c'est pourquoi on parle d'induction. Il est intéressant d'expliquer aux élèves qu'il a fallu attendre près de 150 ans pour voir les premières applications courantes de ce phénomène (plaque à induction, chargeur sans fil de smartphone, etc.)

Document 4 : Solénoïde et champ magnétique

Ce document permet de faire le lien entre l'expérience de Michael Faraday, décrite dans le document 3, et la partie expérimentale de l'activité, en montrant que le champ créé par un solénoïde est identique dans sa forme à celui créé par un aimant droit.

Réponses attendues aux questions :

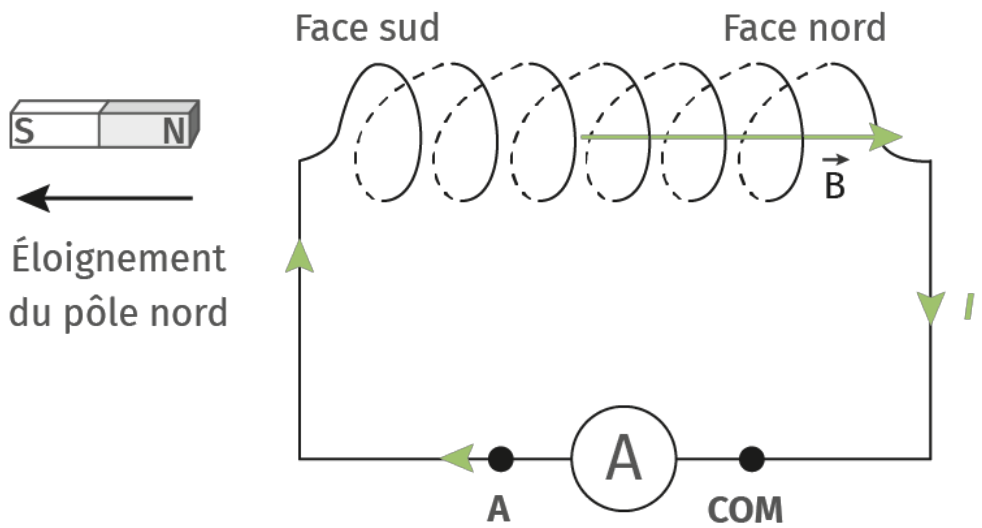
1. Il s'agit d'un moteur.

2. Le passage d'un courant électrique dans le solénoïde crée un champ magnétique dont les lignes de champs sont identiques à celles créées par un aimant droit.

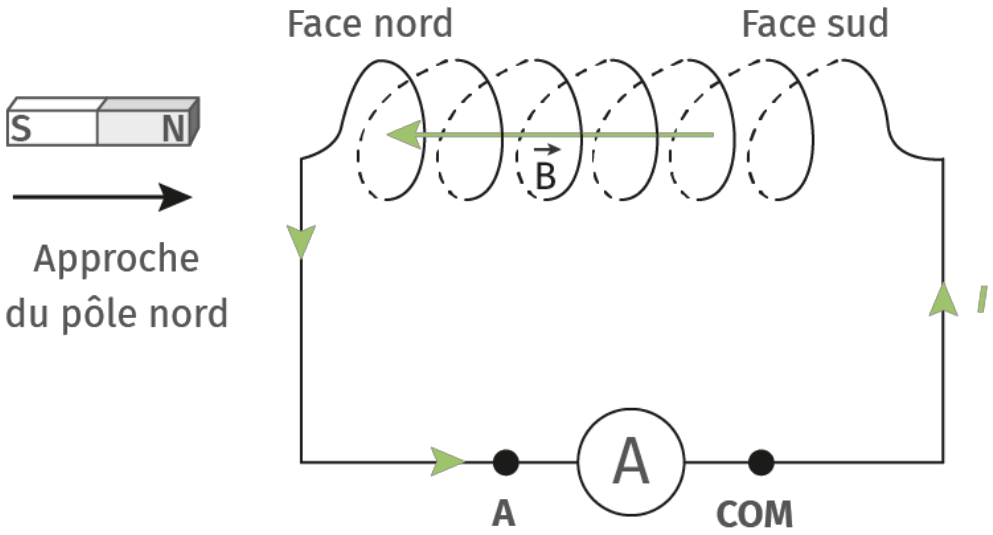
3. Le courant électrique créé s'oppose au déplacement de l'aimant.

4. Si on inverse l'orientation de l'aimant par rapport au solénoïde, le courant électrique créé va dans le sens inverse.

5.



Document sous licence libre Creative Commons



6. Le mouvement interrompu de va-et-vient permet de produire un courant alternatif.

7. On pourrait communiquer à l'aimant un mouvement de rotation devant la bobine. C'est le principe de fonctionnement d'un alternateur.

Protocoles et résultats expérimentaux

Créer un courant électrique par induction

Matériel nécessaire :

- aimant droit,
- fil de cuivre avec un tube en carton (un solénoïde si possible),
- deux fils de connexion,
- deux pinces crocodiles.

Protocole :

- Construire le solénoïde à l'aide du fil de cuivre et du tube en carton.
- Attacher une pince crocodile à chaque extrémité du fil de cuivre, puis relier les pinces au galvanomètre en utilisant les fils de connexion.
- Appliquer un mouvement de va-et-vient à l'aimant droit en le faisant pénétrer à l'intérieur du tube en carton, tout en observant le galvanomètre.
- Laisser l'aimant immobile à l'intérieur du tube en carton et observer le galvanomètre.
- Reproduire l'expérience en inversant l'orientation de l'aimant et observer l'effet produit sur le galvanomètre.

Résultats attendus :

On remarque que l'aiguille du galvanomètre est déviée dans un sens puis dans l'autre à chaque mouvement de va-et-vient de l'aimant. Cependant, elle ne bouge pas lorsque l'aimant est immobile. La déviation de l'aiguille du galvanomètre est inversée quand on inverse le sens d'orientation de l'aimant par rapport au tube en carton.

Document sous licence libre Creative Commons

Ressources complémentaires :

- Informations sur l'électricité et son histoire, d'Ampère à Maxwell, en passant par Faraday : http://www.ampere.cnrs.fr/?lang=fr.

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 2 : Fonctionnement et rendement d'un alternateur (p. 102)

Lien avec le programme :

- Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur mobile) dans un schéma fourni.
- Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer.

Objectifs notionnels :

- La quasi-totalité de la production d'électricité repose de nos jours sur le principe de l'alternateur.
- Le rendement de conversion d'un alternateur est élevé et proche de 1. La baisse de la valeur du rendement dans les centrales électriques utilisant un alternateur a une autre origine.

Objectifs méthodologiques :

- Savoir réaliser un calcul numérique, la relation mathématique étant donnée.
- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pour résoudre un problème.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Fonctionnement d'un alternateur
Le schéma et la visualisation de l'animation complète sur le site du CEA (LLS.fr/ESTalternateur) permettent de comprendre le fonctionnement d'un alternateur et de reconnaître les éléments principaux de celui-ci (stator, rotor).

Document 2 : Le barrage des Trois-Gorges
Les caractéristiques du barrage des Trois-Gorges sont des caractéristiques moyennes. En effet, tous les turbo-alternateurs ne sont pas identiques, les hauteurs de chute diffèrent selon l'endroit où l'on se situe sur ce barrage aux dimensions gigantesques. Il en est de même pour le débit maximal. Il est intéressant d'évaluer les dimensions de l'ouvrage en reportant sur l'image la hauteur de chute moyenne.

Réponses attendues aux questions :

1. La partie fixe de l'alternateur est le stator (une bobine) et la partie mobile de l'alternateur est le rotor (un aimant).

2. La puissance fournie aux turbo-alternateurs par l'eau est :
$P_f = h \cdot d \cdot \rho \cdot g = 80,6 \times 1\ 065 \times 1,0 \times 10^3 \times 9,81 = 8,4 \times 10^8\ \mathrm{W}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le rendement du turbo-alternateur est : $r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{710 \times 10^6}{8,4 \times 10^8} = 0,84 = 84\%$

3. Le rendement est différent à cause des frottements lors de la chute de l'eau dans la conduite forcée, et à l'envasement dans les retenues d'eau (essentiellement dû à l'érosion). La puissance fournie à l'alternateur est donc plus faible.

4. La puissance totale du barrage des Trois Gorges est :
$P = 32 \times 710 \times 10^6 = 22,7 \times 10^9 \text{ W} = 22,7 \text{ GW}$
Le rapport entre les puissances des barrages des Trois Gorges et le barrage d'Itaipu est : $\frac{22,7}{14} = 1,6$
La puissance du barrage des Trois Gorges est donc 1,6 fois supérieure à celle du barrage d'Itaipu.

Ressources complémentaires :

- Sur l'impact écologique du barrage des Trois-Gorges : https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/developpement-durable-impact-ecologique-barrage-trois-gorges-4160/

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 3 : Étude d'une cellule photovoltaïque (p. 103)

Lien avec le programme :

- Tracer la caractéristique *I(U)* d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.

Objectifs notionnels :

- Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique.
- Le couple de valeurs (U,I) pour lesquelles la puissance délivrée par le dipôle est maximale détermine le point de fonctionnement optimal d'un dipôle.

Objectifs méthodologiques :

- Réaliser un montage électrique à partir de son schéma normalisé.
- Utiliser un tableur-grapheur et exploiter une série de données pour résoudre un problème.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

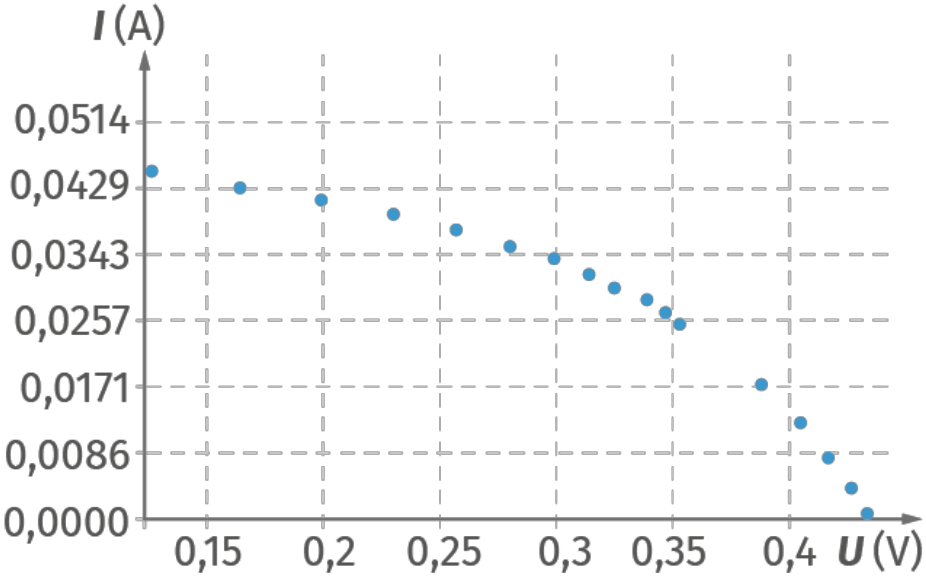
Document 1 : Capteur photovoltaïque
Ce document propose le schéma électrique du montage permettant d'étudier et de construire la caractéristique *I(U)* d'un capteur photovoltaïque.

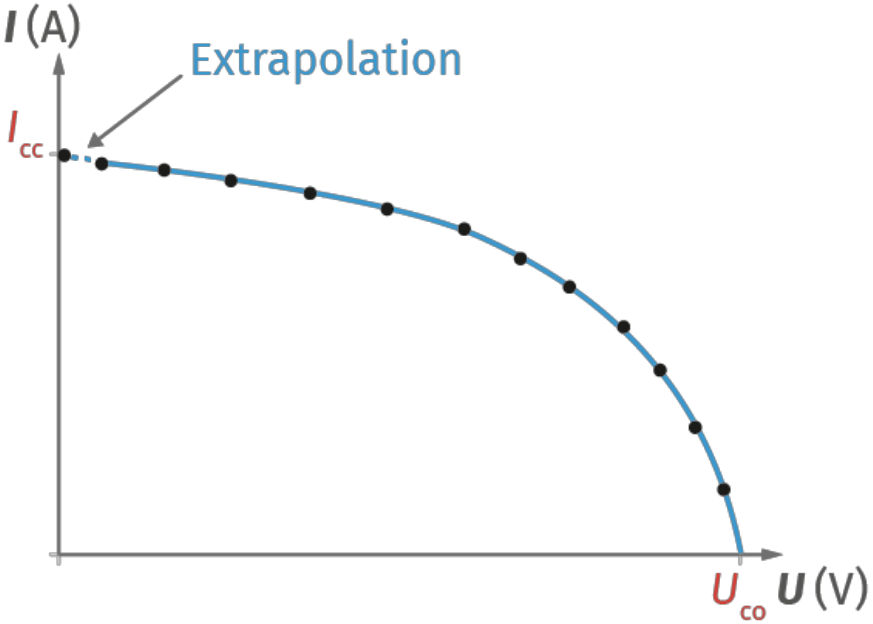
Document 2 : Caractéristique *I(U)*
Le tableau de valeurs fourni permet de donner, pour différentes valeurs de la résistance R du montage du document 1, les couples de valeurs *(U,I)*. L'élève peut alors tracer la caractéristique du capteur photovoltaïque et, en utilisant les fonctionnalités du logiciel tableur-grapheur, déterminer le couple de valeurs *(U,I)* pour lequel le dipôle délivre une puissance maximale.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1.

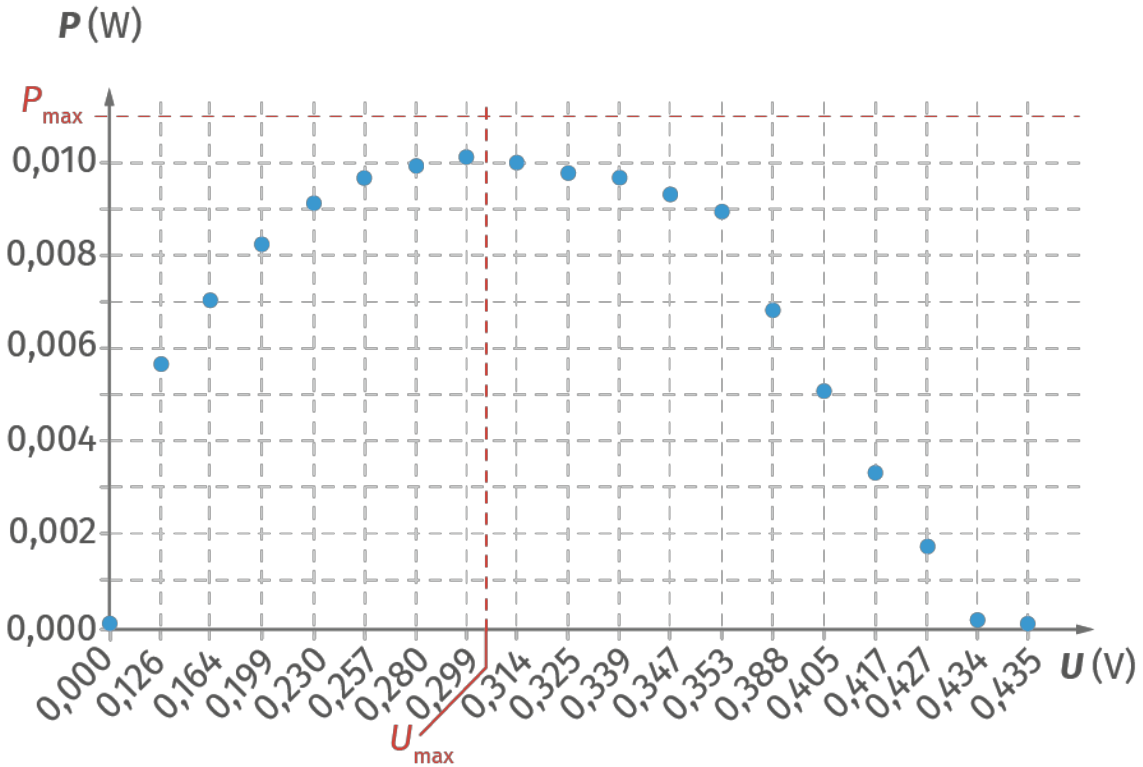




D'après le graphique tracé, on a :
$U_{\mathrm{CO}} = 0,435\ \mathrm{V}$ et $I_{\mathrm{CC}} = 0,052\ \mathrm{A} = 52\ \mathrm{mA}$.

Document sous licence libre Creative Commons

2. Évolution de la puissance en fonction de la tension *P*(*U*)



D'après le graphique tracé : $P_{\max} = 11\ \mathrm{mW}$.
La tension et l'intensité correspondante est : $U_{\max} = 0,3\ \mathrm{V}$ et $I_{\max} = 34\ \mathrm{mA}$.

3. Le point correspond au moment où la courbe n'est plus linéaire.

4. La puissance reçue par le capteur est : $P_{\text{fournie}} = 20 \times 54 \times 10^{-4} = 0,11\ \mathrm{W}$.
Le rendement du capteur photovoltaïque est : $r = \dfrac{P_{\mathrm{u}}}{P_{\mathrm{f}}} = \dfrac{11 \times 10^{3}}{0,11} = 0,10 = 10\%$
Le rendement d'un capteur photovoltaïque est faible en comparaison de celui d'un alternateur.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Protocoles et résultats expérimentaux

Caractéristique d'une cellule photovoltaïque : déterminer le point de fonctionnement optimal d'une cellule photovoltaïque

Matériel nécessaire :

- cellule photovoltaïque (elle peut être issue d'une maquette de type pile à combustible/électrolyse),
- luxmètre,
- lampe à incandescence de bureau dont la puissance radiative se situe entre 1 000 et 2 000 lux,
- fils de connexion,
- 3 multimètres (ampèremètre, voltmètre et ohmmètre),
- potentiomètre ou résistance variable (0 - 10 000 Ω).

Protocole :

- Réaliser le montage électrique correspondant au schéma fourni.
- Réaliser les mesures de l'intensité et de la tension pour différentes valeurs de la résistance allant de 1 à 10 000 Ω.
- Représenter graphiquement la caractéristique *I(U)* ainsi que l'évolution de la puissance en fonction de la tension *P(U)*.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité numérique : Étude d'une cellule photovoltaïque en version expérimentale

Proposition de déclinaison de l'activité 3 en activité expérimentale pour les classes disposant du matériel et du temps nécessaire.

Lien avec le programme :

- Tracer la caractéristique *I(U)* d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.

Objectifs notionnels :

- Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique.
- Le couple de valeurs (U,I) pour lesquelles la puissance délivrée par le dipôle est maximale détermine le point de fonctionnement optimal d'un dipôle.

Objectifs méthodologiques :

- Réaliser un montage électrique à partir de son schéma normalisé.
- Utiliser un tableur-grapheur et exploiter une série de données pour résoudre un problème.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

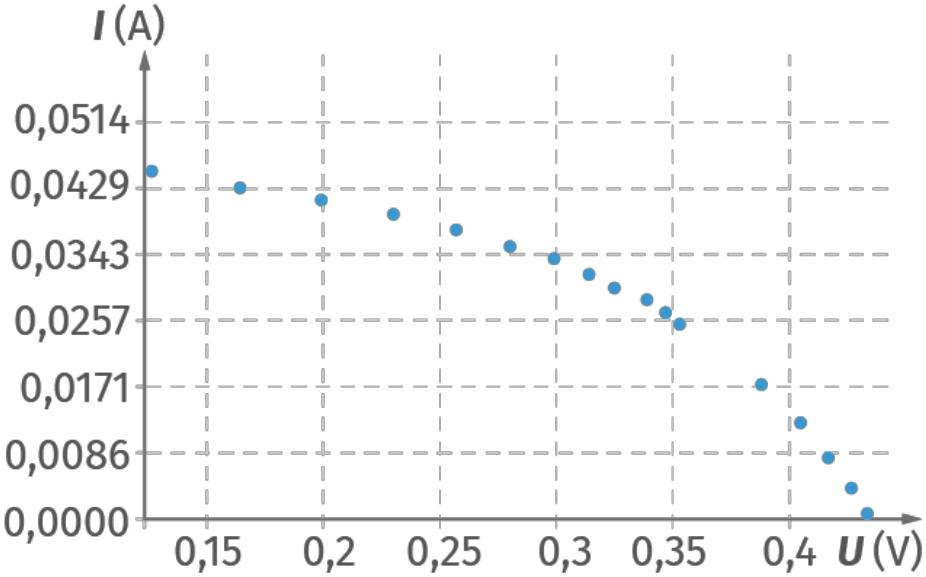
Document 1 : Capteur photovoltaïque

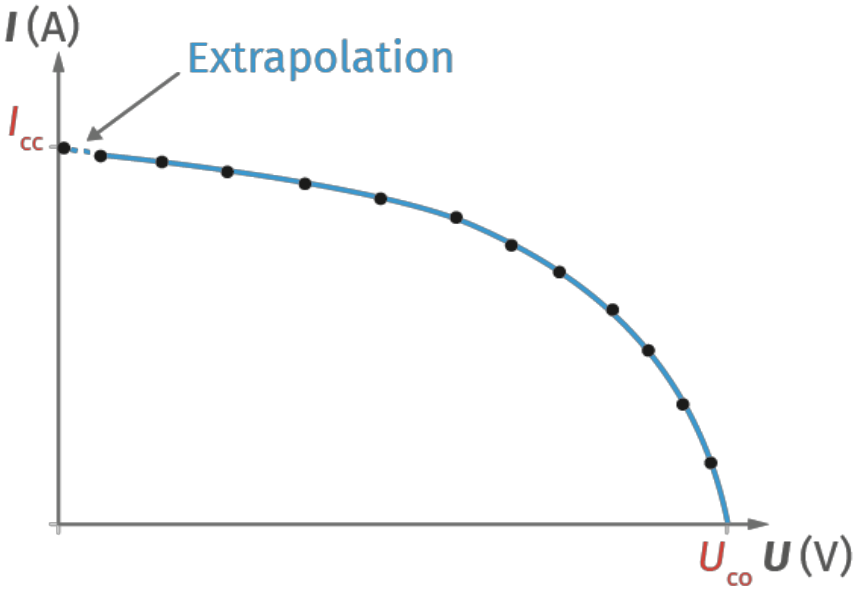
Ce document propose le schéma électrique du montage permettant d'étudier et de construire la caractéristique *I(U)* d'un capteur photovoltaïque.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1.

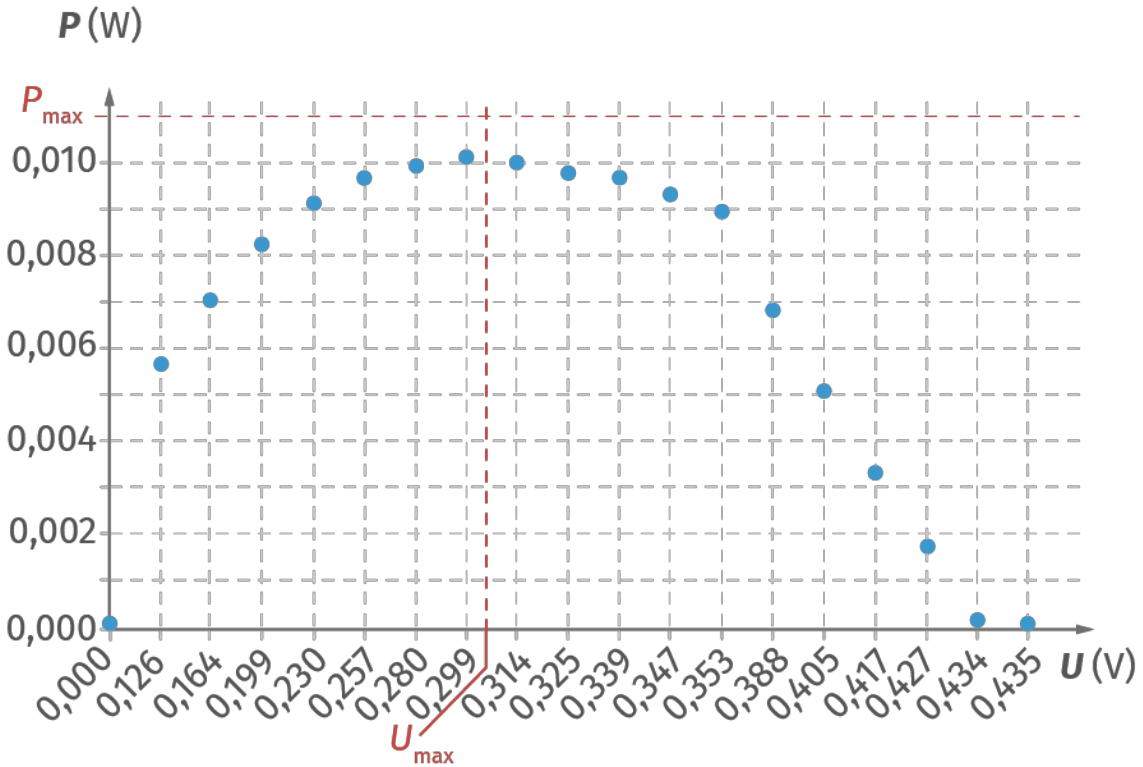




D'après le graphique tracé, on a :
$U_{\mathrm{CO}} = 0,435\ \mathrm{V}$ et $I_{\mathrm{CC}} = 0,052\ \mathrm{A} = 52\ \mathrm{mA}$.

Document sous licence libre Creative Commons

2. Évolution de la puissance en fonction de la tension *P*(*U*)



D'après le graphique tracé : $P_{\text{max}} = 11\ \text{mW}$.
La tension et l'intensité correspondante est : $U_{\text{max}} = 0,3\ \text{V}$ et $I_{\text{max}} = 34\ \text{mA}$.

3. Le point correspond au moment où la courbe n'est plus linéaire.

4. La puissance reçue par le capteur est : $P_{\text{fournie}} = 20 \times 54 \times 10^{-4} = 0,11\ \text{W}$.

Le rendement du capteur photovoltaïque est : $r = \dfrac{P_{\text{u}}}{P_{\text{f}}} = \dfrac{11 \times 10^{3}}{0,11} = 0,10 = 10\%$

Le rendement d'un capteur photovoltaïque est faible en comparaison de celui d'un alternateur.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 4 : Le capteur photovoltaïque (p. 104-105)

Lien avec le programme :

- Comparer le spectre d'absorption d'un matériau semi-conducteur et le spectre solaire pour décider si ce matériau est susceptible d'être utilisé pour fabriquer un capteur photovoltaïque.

Objectifs notionnels :

- Un semi-conducteur est un matériau qui peut passer d'un état isolant à un état conducteur par apport d'énergie lumineuse.
- Ces matériaux sont utilisés en électronique et sont constitutifs des capteurs photovoltaïques. Ceux-ci absorbent l'énergie radiative et la convertissent en énergie électrique.

Objectifs méthodologiques :

- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations de documents à des fins de connaissances et pour résoudre un problème.

Durée estimée : 80 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Conducteur, isolant et semi-conducteur
Ce document présente de façon très simplifiée la théorie des bandes, afin de comprendre la particularité des matériaux semi-conducteurs à travers les notions de bandes de valence, de bande de conduction et de *gap*. La vidéo, LLS.fr/ESTbandes, est très utile pour comprendre ces notions.

Document 2 : Cellule photovoltaïque à simple jonction
Ce document explicite le principe d'une cellule à simple jonction, également abordé dans la vidéo. Celle-ci permet de comprendre l'origine de la production d'un courant électrique par l'utilisation de deux types de semi-conducteurs (dopés n et dopés p).

Document 3 : Spectre solaire
Ce document, qui a peut-être déjà été vu par les élèves, permet de rappeler qu'une partie non négligeable du spectre solaire perçu par une cellule photovoltaïque se situe dans l'infrarouge et pas seulement dans le visible. Cela permet également d'introduire une discussion sur la terminologie employée et la représentation des élèves. En effet, les termes « d'énergie lumineuse » sont souvent employés, et ils sous-entendent souvent pour les élèves « énergie de la lumière visible ». C'est pourquoi on privilégie le terme d'énergie radiative.

Document 4 : Limite de Shockley-Queisser
Il est intéressant de pouvoir discuter de la limite structurelle de rendement des cellules photovoltaïques et des solutions qui sont à l'œuvre pour dépasser la limite de Shockley-Queisser (cellules multijonctions).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 5 : Spectre d'absorption de semi-conducteurs
Ce document permet de voir que les spectres d'absorption peuvent être très différents selon le semi-conducteur. Mais il permet également d'initier une discussion sur la recherche d'alliages aux propriétés semi-conductrices.

Document 6 : Coût de certains matériaux semi-conducteurs comparé au silicium
Ce tableau est à mettre en parallèle avec les documents 4 et 5 et permet d'alimenter la discussion sur le choix d'un semi-conducteur pour réaliser une cellule photovoltaïque. On voit clairement que le silicium est encore pour l'instant le meilleur choix, car il offre l'un des meilleurs rendements théoriques avec un spectre d'absorption relativement large, et ce pour un coût bien moindre, comparé à ses concurrents directs.

Réponses attendues aux questions :

1. L'énergie permettant aux électrons de franchir le *gap* des semi-conducteurs provient de l'énergie radiative du Soleil, donc des photons.

2. Les électrons se déplacent de la partie dopée n à la partie dopée p du semi-conducteur, en passant par le circuit électrique extérieur.

3. Les semi-conducteurs ayant un gap compris entre 1 et 1,7 eV sont Si, InP, a-Si, GaAS et CdTe.

4. Le semi-conducteur ayant la plus large bande d'absorption est Ge (germanium). Il n'est pas utilisé à la place du silicium car son *gap* est trop faible et il coûte 4 fois plus cher que le silicium.

5. Les semi-conducteurs absorbent essentiellement dans le visible (380 nm-780 nm) et dans l'infrarouge jusqu'à 1 400 nm pour le germanium par exemple. Ils absorbent peu dans les ultraviolets (jusqu'à 250 nm environ).

6. L'utilisation de semi-conducteurs multi-jonctions permet d'augmenter le rendement de la cellule, donc la puissance disponible est plus élevée pour une bande d'absorption plus élevée.

Bibliographie :

- C. Ngô et H. Ngô, *Physique des semi-conducteurs*, Dunod,1998.
- L. Chancelier et E Laurent, *Électricité photovoltaïque*, Gret, 1996.
- G. Moine, *L'électrification solaire photovoltaïque*, Observ'ER, 2016.

Ressources complémentaires :

- Le site du CEA : www.CEA.fr et plus particulièrement le livret sur les énergie du XXIe siècle : http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/energies-du-21e-siecle.aspx

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

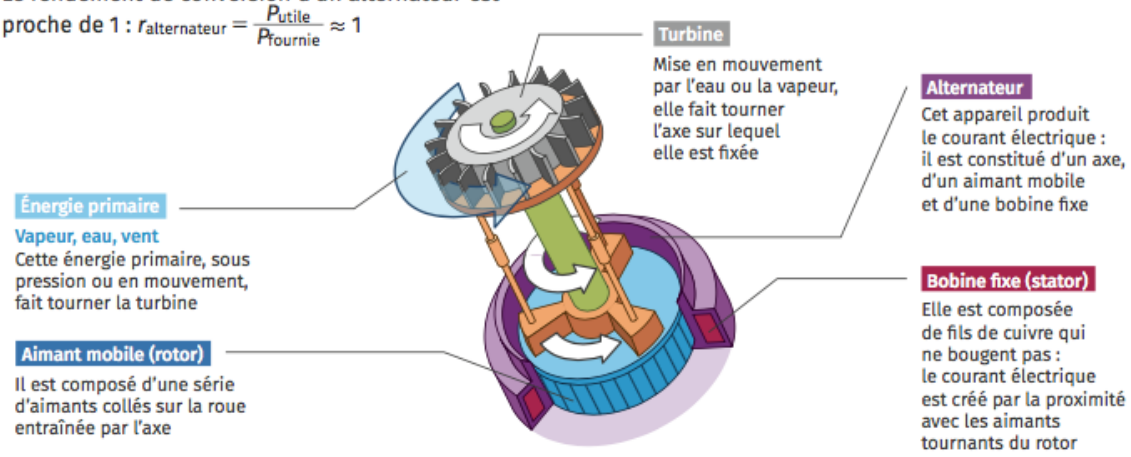
Bilan (p. 107)

La production conventionnelle d'énergie électrique

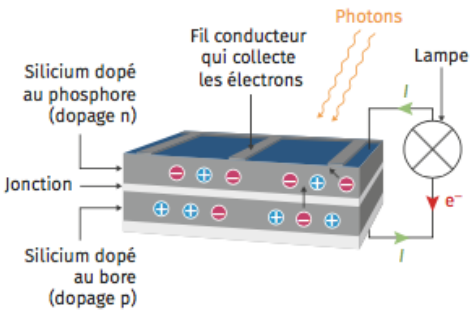
La quantité d'énergie convertie par un alternateur dépend :
- de sa vitesse de rotation ;
- de l'intensité du champ magnétique ;
- du nombre de spires (boucles) de la bobine de cuivre.

Énergie cinétique de rotation :
- pour l'alternateur d'un vélo, le mouvement de la roue entraîne la roulette, ce qui créé le courant, faisant briller la lampe. L'alternateur de la centrale fonctionne de la même manière.

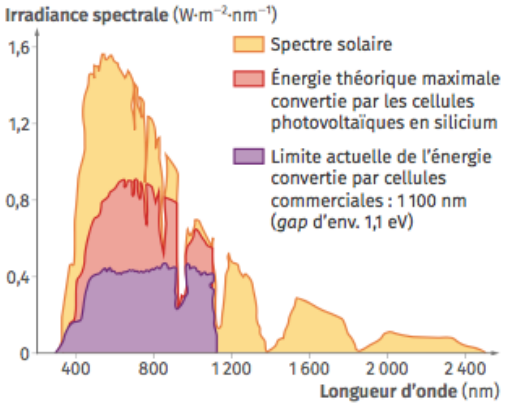
Le rendement de conversion d'un alternateur est proche de 1 : $r_{alternateur} = \frac{P_{utile}}{P_{fournie}} \approx 1$



Les cellules photovoltaïques



Composition d'une cellule photovoltaïque.



Conversion de l'énergie solaire en électricité en fonction de la longueur d'onde.

Une cellule photovoltaïque est constituée de matériaux semi-conducteurs qui transforment de l'énergie lumineuse en énergie électrique. La partie du spectre solaire absorbée par une cellule photovoltaïque dépend de la nature du matériau semi-conducteur. Le rendement des cellules photovoltaïques reste encore faible (environ 25 %). Pour l'augmenter, l'une des techniques consiste à superposer plusieurs couches de semi-conducteurs différents (cellules à multi-jonctions).

Document sous licence libre Creative Commons

Exercices

Zone d'échauffement (p. 108)

1. Alternateur de vélo.

a. Le stator est en orange sur le schéma. Le rotor est, quant à lui, en vert et rouge.

b. Le stator est constitué de bobines de cuivre tandis que le rotor est un aimant.

2. Barrage hydroélectrique.

a. La puissance fournie par l'eau du barrage est : $P_{\mathrm{f}} = \dfrac{P_{\mathrm{u}}}{r} = \dfrac{300}{0,82} = 366 \text{ MW}$

b. Le rendement de l'alternateur est : $r_{\text{alternateur}} = \dfrac{0,82}{0,85} = 0,96 = 96\%$

c. Les pertes électriques proviennent de l'envasement dans la retenue d'eau, des frottements de l'eau sur la conduite forcée et des frottements dans l'alternateur.

3. Caractéristiques de cellules photovoltaïques.

a. Pour le capteur 1 , graphiquement : $U_1 = 4 \text{ V}$ et $I_1 = 1,3 \text{ A}$.

Pour le capteur 2 , graphiquement : $U_2 = 3 \text{ V}$ et $I_2 = 1,75 \text{ A}$.

b. La puissance délivrée par le capteur 1 est : $P_1 = U_1 \cdot I_1 = 4 \times 1,3 = 5,2 \text{ W}$.

La puissance délivrée par le capteur 2 est : $P_2 = U_2 \cdot I_2 = 3 \times 1,75 = 5,3 \text{ W}$.

On peut considérer que ces 2 capteurs délivrent la même puissance.

c. Pour le capteur 1 : $I_{\mathrm{CC1}} = 1,6 \text{ A}$ et $U_{\mathrm{CO1}} = 4,8 \text{ V}$.

Pour le capteur 2 : $I_{\mathrm{CC2}} = 2,0 \text{ A}$ et $U_{\mathrm{CO2}} = 3,4 \text{ V}$.

4. Alternateur de voiture. Un alternateur convertit :

c. une énergie mécanique (énergie de cinétique de rotation en général) en énergie électrique.

Exercices supplémentaires :

A. Expliquer simplement le principe de fonctionnement d'un alternateur pour produire de l'électricité.

L'alternateur composé d'un stator, constitué de bobines de fil de cuivre, et d'un rotor, composé d'aimants ou d'électroaimants, et entrainé, le plus souvent par une turbine, produit de l'énergie électrique par induction

B. La puissance maximale délivrée par une cellule voltaïque est atteinte :

a. à l'intensité maximale, la tension dépendant de la caractéristique.

b. à la tension maximale, l'intensité dépendant de la caractéristique.

c. à un autre couple de valeurs de tension et d'intensité.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

C. Un dipôle de puissance *P* convertit une énergie *E* pendant un intervalle Δ*t*, selon la formule :

a. $E = \frac{P}{\Delta t}$

b. $E = \frac{\Delta t}{P}$

c. $\boxed{E = P \cdot \Delta t}$

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 109)

5. Les pérovskites

Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

Correction :

1. Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel un apport d'énergie extérieur (photons) peut permettre à un électron de contribuer à un courant électrique, en franchissant le *gap* d'énergie du matériau. La conductivité électrique d'un semi-conducteur est donc intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

2. Les pérovskites ont un maximum d'absorbance dans la partie visible du spectre électromagnétique (400 nm à 800 nm).

3. L'utilisation commune des pérovskites et du silicium permet de couvrir une bande plus large du spectre électromagnétique et donc d'augmenter le rendement du capteur photovoltaïque.

6. Comparaison

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Correction :

1. La puissance d'une cellule photovoltaïque est :
$P_{\text{cellule}} = U_{\max} \cdot I_{\max} = 15,5 \times 1,2 = 18,6 \text{ W}$

Le nombre nécessaire de cellules pour être équivalent à la puissance de la centrale nucléaire est : $N_{\text{cellule}} = \dfrac{P_{\text{centrale}}}{P_{\text{cellule}}} = \dfrac{900 \times 10^6}{18,6} = 48,4 \times 10^6 \text{ cellules}$

La surface de panneau solaire nécessaire est :
$S_{\text{totale}} = N_{\text{cellule}} \cdot S_{\text{cellule}} = 48,4 \times 10^6 \times 0,200 = 9,68 \times 10^6 \text{ m}^2 = 9,68 \text{ km}^2$

Document sous licence libre Creative Commons

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

1. Au bout de combien de jours l'énergie délivrée par un champ de panneaux solaires dont la surface totale des cellules photovoltaïques est de 1,0 km2 sera-t-elle égale à l'énergie délivrée en 1 jour par la centrale nucléaire ? On considère que les panneaux solaires fonctionnent en moyenne 12 heures par jour.

L'énergie électrique produite par la centrale par jour est :
$E_{\text{centrale}} = P_{\text{centrale}} \times t = 900 \times 10^6 \times 3\ 600 \times 24 = 7,8 \times 10^{13}\ \text{J}$

La puissance délivrée par une cellule photovoltaïque est :
$P_{\text{cellule}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} = 15,5 \times 1,2 = 18,6\ \text{W}$
Cette puissance est délivrée pour une surface de cellule de 0,200 m2.

On exprime la surface totale du champ en m2, puis, par proportionnalité, on trouve que la puissance délivrée par le champ de cellules photovoltaïques de surface 1,0 km2 est :

$$P_{\text{champ}} = \frac{\text{Surface du champ} \times P_{\text{cellule}}}{\text{Surface cellule}} = \frac{1,0 \times 10^6 \times 18,6}{0,200} = 9,3 \times 10^7\ \text{W} = 93\ \text{MW}$$

Le nombre de jours de fonctionnement du parc pour produire la même quantité d'énergie que la centrale est :

$$t_{\text{jours}} = \frac{E_{\text{centrale}}}{P_{\text{parc}}} \times \frac{2}{3\ 600 \times 24} = \frac{7,8 \times 10^{13}}{9,3 \times 10^7} \times \frac{2}{3\ 600 \times 24} = 1,9 \times 10^1\ \text{jours}$$

Le nombre de jours peut paraître peu élevé. Il faut cependant considérer qu'il s'agit d'un champ de cellules photovoltaïques de 1 km2 et que les conditions météorologiques sont très favorables.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 110-111)

7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Compétence principalement travaillée : Savoir exploiter la caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Correction :

1. D'après le graphique, $I_{\text{CC}} = 1,7\ \text{A}$ et $U_{\text{CO}} = 6,0\ \text{V}$.

2. La puissance maximale correspond au sommet de la courbe rose. En utilisant la courbe verte, on en déduit les valeurs maximales de la tension et de l'intensité : $I_{\text{max}} = 1,6\ \text{A}$ et $U_{\text{max}} = 5,0\ \text{V}$.

3. La puissance maximale de la cellule est : $P_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} = 5,0 \times 1,6 = 8\ \text{W}$. C'est donc suffisant pour charger le smartphone qui nécessite 5 W.

4. La puissance absorbée par la cellule photovoltaïque est :
$P_{\text{abs}} = E \cdot S = 1\ 000 \times\ 15 \times 10^{-2} \times 30 \times 10^{-2} = 45\ \text{W}$.

5. Le rendement de la cellule est : $r = \dfrac{P_{\text{max}}}{P_{\text{abs}}} = \dfrac{8}{45} = 0,17 = 17\%$

8. Pour ou contre le photovoltaïque

Compétence principalement travaillée : Rédiger une réponse argumentée

Correction :

1. L'énergie solaire peut être utilisée pour :
   - produire de l'énergie électrique (cellules photovoltaïques) ;
   - produire de l'énergie thermique basse température (panneaux solaires thermiques) ;
   - produire de l'énergie thermique haute température (fours solaires, centrales solaires thermodynamiques).

2. **Idée 1 :** l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable. Elle est inépuisable et représente donc un moyen de production d'énergie d'avenir face à l'épuisement des ressources fossiles.
Idée 2 : l'énergie solaire est intermittente et ne peut pas suffire pour fournir de l'énergie électrique. De plus, les rendements sont encore assez faibles et les matériaux qui composent les capteurs photovoltaïques sont assez durs à extraire et sources de pollution.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

9. Alternateur bouteille/alternateur moyeu

Compétence principalement travaillée : Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer

Correction :

1. La puissance transmise à la roue est : $P = \frac{2}{100} \times 310 = 6,2 \text{ W}$

2. La puissance produite par l'alternateur bouteille est : $P_\text{b} = 3,3 \text{ W}$. La puissance produite par l'alternateur moyeu est : $P_\text{m} = 5,0 \text{ W}$.

3. Le rendement de l'alternateur bouteille est : $r_\text{b} = \frac{3,3}{6,2} = 0,53 = 53\%$

Le rendement de l'alternateur moyeu est : $r_\text{m} = \frac{5,0}{6,2} = 0,81 = 81\%$

4. L'intérêt de produire une puissance supérieure est de compenser les pertes lors des transferts d'énergie. Cela supprime aussi les frottements sur la jante de l'alternateur bouteille. De plus, il est possible d'envisager d'utiliser l'excédent de puissance pour recharger un appareil électrique comme un smartphone.

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer

1. Si on estime que 2 % de la puissance développée par un cycliste est transmise à la roue, quelle serait la puissance développée par le cycliste roulant sur un vélo muni d'une dynamo moyeu dont le rendement est de 80 %, permettant d'alimenter une lampe de 4 W et de charger un *smartphone* nécessitant une puissance de 5 W ?

$$P_\text{utile} = 4,0 + 5,0 = 9,0 \text{ W}$$

$$P_\text{reçue} = \frac{P_\text{utile}}{r} = \frac{9,0}{0,8} = 11 \text{ W}$$

$$P_\text{cycliste} = \frac{P_\text{reçue}}{0,02} = \frac{11}{0,02} = 5,5 \times 10^2 \text{ W}$$

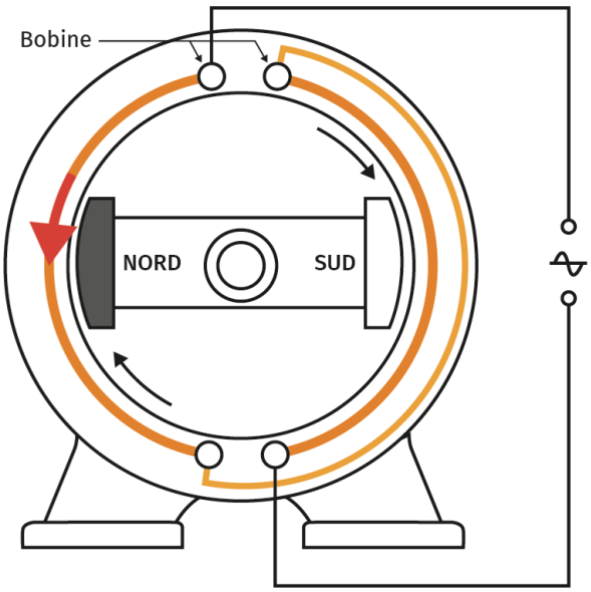
Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

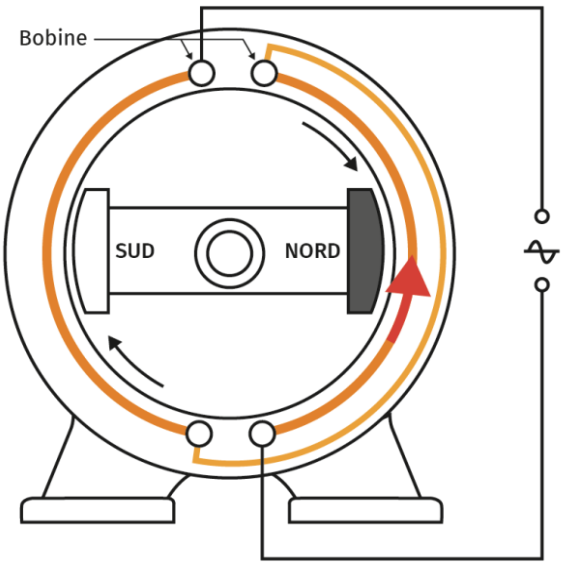
10. Produire un courant alternatif

Compétence principalement travaillée : Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur

Correction :

1.





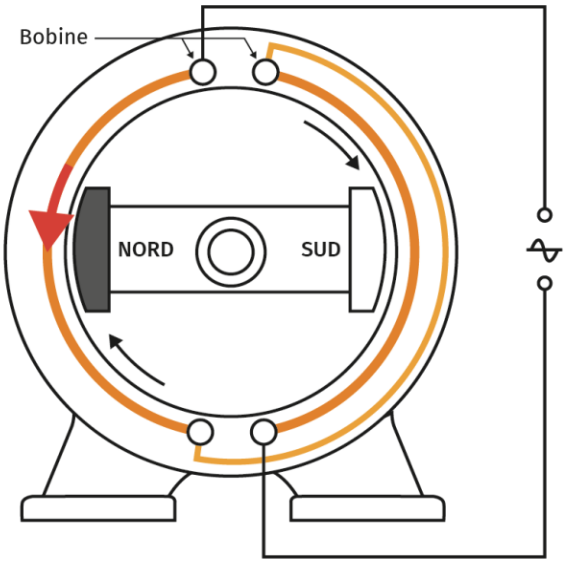
La variation du champ magnétique est alternativement dans un sens, puis dans l'autre, ce qui crée un courant induit qui s'oppose à la variation du champ magnétique, tantôt dans un sens, puis dans l'autre. Cela crée un courant alternatif dont la fréquence dépend de la vitesse de rotation de l'aimant.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

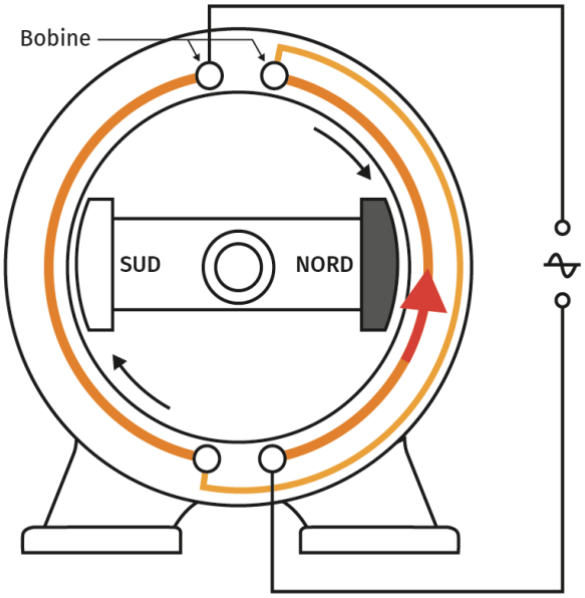
Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur

1. Reproduire le schéma et représenter arbitrairement le sens de circulation du courant électrique dans le circuit électrique et la bobine.



2. Reproduire le schéma en quand l'aimant à réalisé un demi-tour par rapport à sa position initiale. Puis faire apparaître le sens de circulation du courant électrique dans le circuit et la bobine.



3. Choisir parmi les propositions ci-dessous celles qui sont vraies :

a. Le courant électrique change de sens à chaque fois que l'aimant fait un tour complet.
b. Le courant électrique change de sens à chaque fois que l'aimant fait un demi-tour.
c. Le courant électrique change 2 fois de sens à chaque fois que l'aimant fait un tour complet.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Le coin des experts (p. 112)

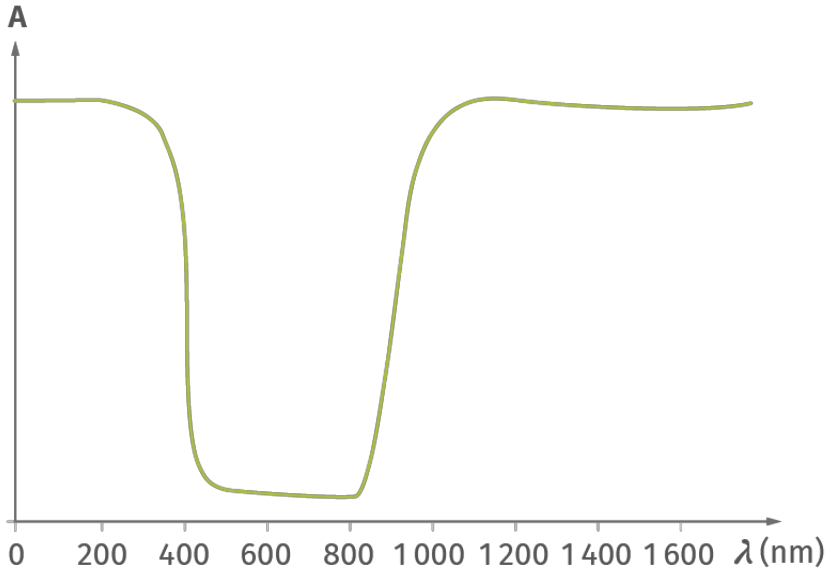
11. Cellule photovoltaïque du futur

Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

Correction :

1. L'intervalle de longueur d'onde du domaine des UV est de 100 à 400 nm. L'intervalle de longueur d'onde des IR est de 800 nm à 20 µm.

2. Allure de la courbe :



3. Le rendement de cette cellule est :

$$r = \frac{P_u}{P_f} = \frac{P_u}{E \cdot S} = \frac{0,72}{1\ 000 \times 8,0 \times 10^{-2} \times 12,5 \times 10^{-2}} = 0,072 = 7,2\%$$

4. Le rendement est plus faible qu'une cellule photovoltaïque conventionnelle (environ 20%).

5. Le fait que le rendement soit plus faible n'est pas réellement un problème, car ce type de cellule laisse tout de même passer la lumière du jour, elles peuvent donc être montées sur des fenêtres sans que cela diminue la luminosité de la pièce. De plus, les surface vitrées peuvent être très importantes dans beaucoup de constructions modernes, ainsi la surface totale exposée ramenée au m^2 peut être très importante.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

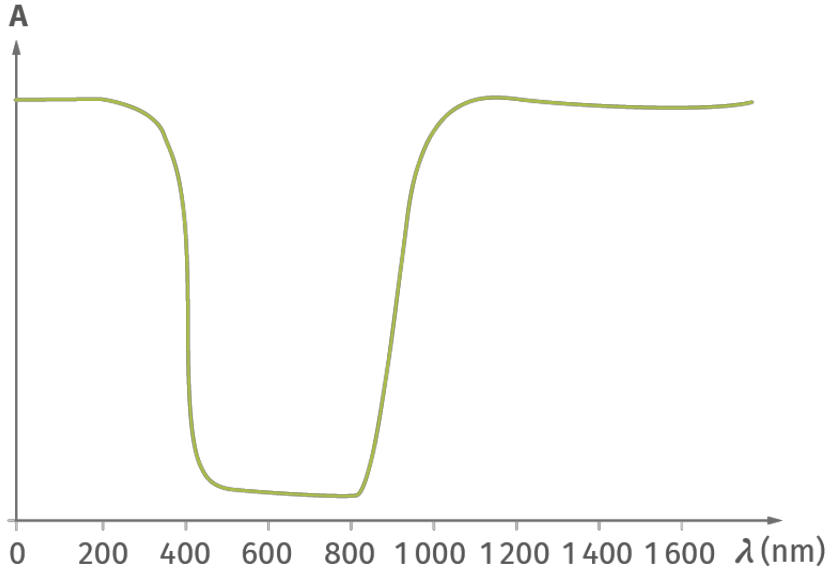
Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Interpréter et exploiter un spectre d'absorption

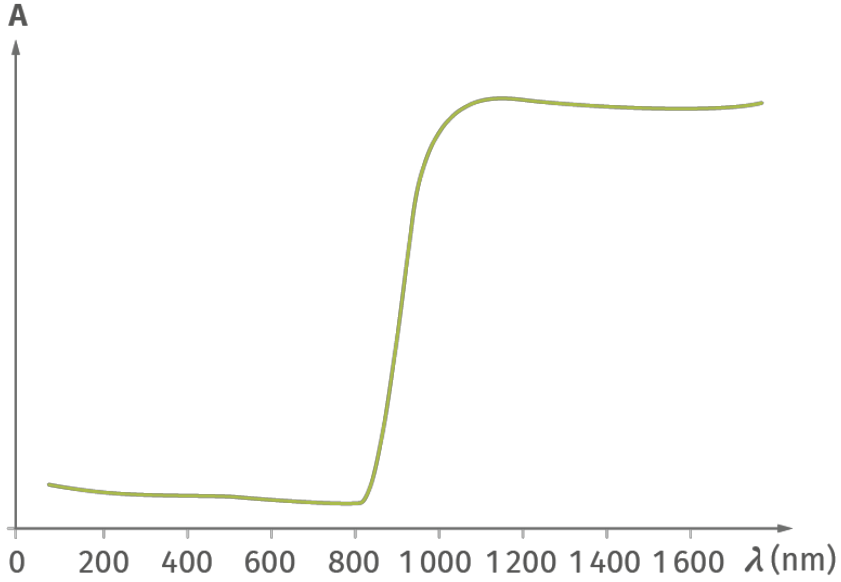
1. Donner l'intervalle de longueur d'onde correspondant au domaine UV, au domaine visible et au domaine IR.
L'intervalle de longueur d'onde du domaine des UV est de 100 à 400 nm. L'intervalle de longueur d'onde des IR est de 800 nm à 20 µm.

2. Identifier pour chaque courbe ci-dessous, les domaines des rayonnements absorbés. Quelle(s) courbes correspond(ent) à une cellule transparente ?

Courbe a :

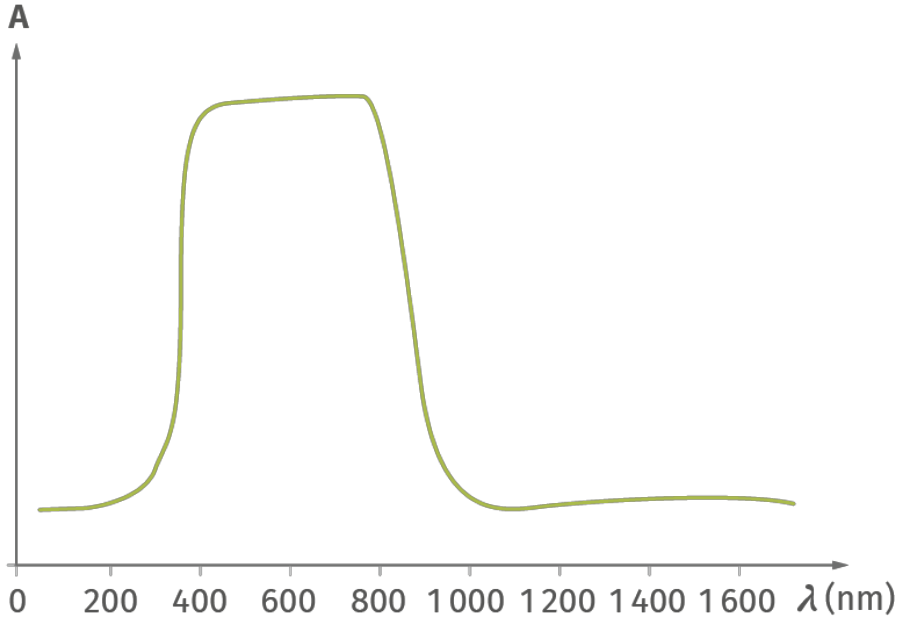


Courbe b :



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Courbe c :



Courbe a. : Absorption des UV et des IR.
Courbe b. : Absorption des IR.
Courbe c. : Absorption de la lumière visible.
Les courbes a. et b. correspondent donc à des cellules transparentes.

3. Une cellule photovoltaïque transparente de surface 0,012 m^2 permet de générer une puissance électrique de 0,86 W lorsqu'elle reçoit une puissances lumineuse surfacique de 1 000 W·m^{-2}.

a. Calculer la puissance lumineuse reçue par la cellule.
La puissance lumineuse reçue est : $P = 1\ 000 \times 0,012 = 12\ \mathrm{W}$

b. En déduire le rendement de la cellule.
Le rendement de cette cellule est $r = \dfrac{0,86}{12} = 0,072 = 7,2\%$

4. Comparer la valeur obtenue avec le rendement moyen de cellules conventionnelles.
Le rendement est plus faible qu'une cellule photovoltaïque conventionnelle (environ 20 %).

5. Cette valeur de rendement peut-elle être facilement compensée dans le cas de ces cellules transparentes ? Détailler la réponse.
Pour obtenir la même puissance avec un rendement de conversion plus faible, il faudrait utiliser des surfaces plus grandes. Ces cellules étant transparentes, on peut potentiellement les utiliser pour optimiser les nombreuses surfaces vitrées des immeubles. Cette surface supplémentaire est donc potentiellement disponible.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 6 : Les atouts de l'électricité

Présentation **2**

Activités **5**

Activité documentaire 1 : La production d'électricité sans combustion (p. 114-115) 5

Activité débat 2 : Production d'électricité : une solution idéale ? (p. 116-117) 13

Activité documentaire 3 : Stockage de l'énergie (p. 118) 16

Activité documentaire 4 : Énergie stockée dans un barrage (p. 119) 20

Bilan (p. 121) **23**

Exercices **24**

Zone d'échauffement (p. 122) 24

L'atelier des apprentis (p. 123) 26

Le repaire des initiés (p. 124-125) 29

Le coin des experts (p. 126) 39

Document sous licence libre Creative Commons

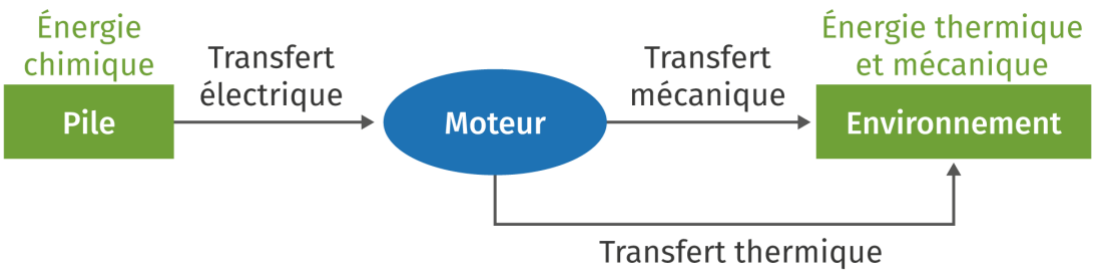
Présentation

Préambule concernant les formes d'énergie, les chaînes énergétiques et l'énergie électrique.
Dans ce chapitre, l'identification des formes d'énergies est une capacité centrale. Afin de permettre la réalisation de chaînes énergétiques compréhensibles par tous, il faut convenir d'un formalisme commun. Nous vous proposons deux approches pour le traitement de celles-ci.

L'énergie est définie comme la grandeur mesurant la capacité d'un système à subir une transformation. Ainsi, une forme d'énergie est systématiquement associée à un système (que l'on peut appeler réservoir). En toute rigueur, l'énergie électrique n'est donc pas une forme d'énergie puisqu'on ne peut pas lui associer de système. L'électricité est un moyen de transfert de l'énergie. Cependant, le B.O. faisant mention de l'énergie électrique, nous avons fait un compromis, présenté sous cette forme aux élèves dans la fiche méthode sur l'énergie (disponible en version numérique : LLS.fr/ESTFM17) :
« Le terme "énergie électrique" est un abus de langage, il s'agit en fait d'un transfert d'énergie par l'électricité ou plus simplement d'un transfert électrique. Néanmoins, par commodité et pour alléger les chaînes énergétiques, on s'autorise à parler d'énergie électrique. Dans ce cas le réservoir associé est alors le circuit électrique pour une pile se déchargeant dans un circuit, ou le réseau électrique pour une centrale. »

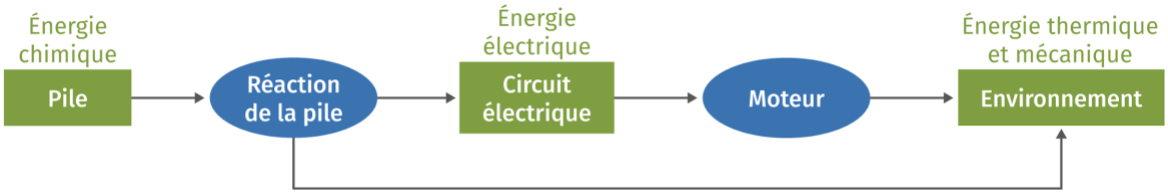
La première possibilité, la plus complète, est alors de faire figurer dans les chaînes énergétiques:
- les réservoirs accompagnés de la forme de l'énergie stockée ;
- les convertisseurs ;
- les formes de transfert d'énergie.

La chaîne énergétique d'un circuit électrique dans lequel une pile fait tourner un moteur muni d'une hélice aurait alors la forme suivante :

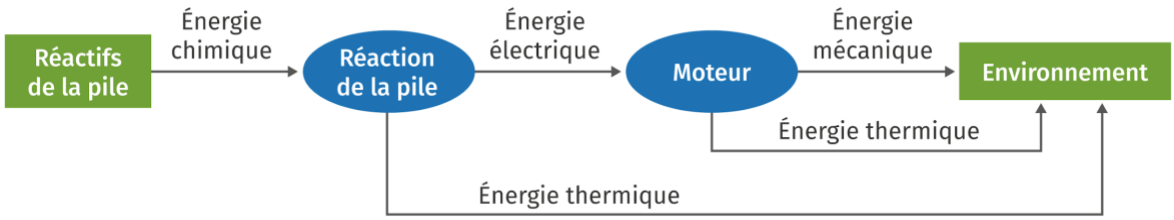


Document sous licence libre Creative Commons

En faisant apparaître l'énergie électrique et en omettant les transferts :



La seconde possibilité, plus simple et plus courante, consiste à se concentrer sur les convertisseurs d'énergie et sur les formes d'énergie avant et après conversion. On assimile alors implicitement la notion d'énergie et de transfert. La même chaîne que précédemment serait alors représentée de la manière suivante :



Pour approfondir la question, nous vous invitons à aller consulter l'excellent site http://pegase.ens-lyon.fr/ de l'Institut français de l'éducation. Vous y trouverez notamment dans les ressources pour le collège le premier formalisme dont nous nous sommes inspirés.

Présentation du chapitre

L'électricité joue un rôle majeur dans notre société depuis un peu plus de deux siècles. Elle est au cœur de nombreux enjeux sociétaux (économiques, technologiques, environnementaux, etc.). Produire de l'électricité sans contribuer au réchauffement climatique, en concevoir le stockage sous d'autres formes, optimiser son transport sont aujourd'hui des objectifs majeurs d'une transition climatique et environnementale.

L'énergie électrique présente de nombreux avantages :

- une distribution aisée, sûre et à faible impact écologique ;
- l'existence de réseaux de distribution très étendus ;
- la disponibilité de convertisseurs de bon rendement permettant de transformer l'énergie électrique en d'autres formes d'énergie ou, symétriquement, d'obtenir de l'énergie électrique.

L'existence de procèdes d'obtention d'énergie électrique sans combustion justifie le rôle central que cette forme d'énergie est amenée à jouer dans l'avenir.

Ce qui a été enseigné en seconde et au cycle 4 :

- Énergie, puissance, relation entre puissance et énergie.
- Identification des sources, transferts et conversions d'énergie.
- Bilan énergétique pour un système simple.
- Conversion d'un type d'énergie en un autre.

Document sous licence libre Creative Commons

Ce qui a été enseigné en première spécialité Physique-Chimie :

- Puissance et énergie.
- Rendement d'un convertisseur.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Tous les chapitres du thème 2 (chapitres 5 à 8) sont fortement imbriqués, avec des notions qui peuvent revenir d'un chapitre à l'autre :

- chaînes énergétiques ;
- rendement de conversion d'un système ;
- production de l'énergie électrique ;
- fonctionnement d'un capteur photovoltaïque.

Bibliographie :

Ce chapitre est ancré dans l'actualité. L'idée est donc d'aller piocher dans les articles de presse pour compléter ou actualiser les informations données dans les activités.

- Le site du journal du CNRS est particulièrement intéressant : https://lejournal.cnrs.fr/.
- De même, le site de l'agence internationale de l'énergie fournit un grand nombre de graphiques/données : https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Coal%20production%20by%20type

Sitographie :

- Le site du CEA : http://www.cea.fr/
- Le site d'EDF : https://www.edf.fr/
- Le site Connaissances des énergies : https://www.connaissancedesenergies.org/
- Le dispositif « J'apprends l'énergie » mis en place par ENGIE : https://www.engie.com/dispositif-pedagogique-japprends-lenergie
- Le site Planète énergies mis en place par Total : https://www.planete-energies.com/fr
- Le kit pédagogique de Total : https://www.kit-pedagogique.total.com/fr

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Les combustibles alternatifs à empreinte carbone réduite.
- Les enjeux de l'utilisation de l'énergie nucléaire : de la fission à la fusion contrôlée.
- Les accumulateurs électrochimiques dans la société.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activités

Les activités de ce chapitre ont pour objectif de faire le panorama des moyens utilisés aujourd'hui pour produire de l'électricité sans utiliser de combustion. On peut résumer ainsi les objectifs des différentes activités :

1. Comprendre le fonctionnement des différentes technologies utilisées aujourd'hui.
2. Quels en sont leurs avantages et leurs inconvénients.
3. Parcourir les moyens de stockage à notre disposition.
4. Effectuer un bilan énergétique global des transferts/conversions/pertes dans le cas d'une situation concrète.

Activité documentaire 1 : La production d'électricité sans combustion (p. 114-115)

Le but de l'activité est d'identifier et de comprendre le fonctionnement de la plupart des moyens de production d'électricité sans combustion. Ces moyens de production sont intéressants, car ils émettent moins de dioxyde de carbone (gaz à effet de serre) que les centrales thermiques à flamme (à base de la combustion de charbon, pétrole ou gaz naturel). La plupart de ces moyens de production mettent en œuvre des sources d'énergie renouvelables.

Lien avec le programme :

- Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion :
  - la conversion d'énergie mécanique, soit directe (dynamos, éoliennes, hydroliennes, barrages hydroélectriques), soit indirecte à partir d'énergie thermique (centrales nucléaires, centrales solaires thermiques, géothermie) ;
  - la conversion de l'énergie radiative reçue du Soleil (panneaux photovoltaïques) ;
  - la conversion électrochimique (piles ou accumulateurs conventionnels, piles à hydrogène).
- Décrire des exemples de chaînes de transformations énergétiques permettant d'obtenir de l'énergie électrique à partir de différentes ressources primaires d'énergie.

Objectifs notionnels :

- Connaître et comprendre le fonctionnement des méthodes permettant d'obtenir de l'énergie électrique sans combustion.
- Réaliser des chaînes de transformations énergétiques.

Objectifs méthodologiques :

- Extraire et organiser l'information utile.
- Mettre en œuvre un raisonnement logique simple.
- Représenter et modéliser des phénomènes.

Durée estimée : 30 minutes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation des documents

Document 1 : Conversion d'énergie chimique
Ce document explique le principe de fonctionnement des piles électrochimiques. Une distinction est faite entre les piles usuelles et les piles à hydrogène.

Document 2 : Conversion directe d'énergie mécanique
Le principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques est présenté, puis celui des éoliennes et hydroliennes.

Document 3 : Conversion d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique
Ce document explicite le principe de fonctionnement des centrales nucléaires.

Document 4 : Conversion d'énergie radiative
Ici c'est le principe de fonctionnement des panneaux solaires thermiques et des panneaux photovoltaïques qui est vu.

Chaque document est enrichi d'une vidéo, disponible sur LLS.fr/ESTP115, qui permet de mieux visualiser le principe de fonctionnement et d'aller plus loin dans la compréhension du phénomène. Un renvoi est aussi fait vers une fiche méthode sur le concept d'énergie (LLS.fr/ESTFM17)

Réponses attendues aux questions :

1. Un point commun entre les conversions directes et indirectes d'énergie mécanique est la présence d'un fluide (eau, air) pour faire tourner une turbine qui est couplée à un alternateur. La rotation de cet alternateur entraîne une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.
Une différence est l'utilisation d'un fluide comme intermédiaire entre le réservoir initial d'énergie le couple alternateur-turbine dans le cas des conversions indirectes. La conversion d'énergie ne se fait donc pas directement depuis le réservoir d'énergie, mais nécessite une conversion supplémentaire.

2. Une réaction d'oxydoréduction consiste en un échange d'électrons entre les réactifs mis en présence. Dans une pile, les réactifs sont dans des compartiments séparés. Si on les relie à l'aide d'un conducteur électrique, les électrons peuvent passer dans le conducteur, ce qui crée un courant électrique. La pile convertit ainsi l'énergie chimique en énergie électrique.

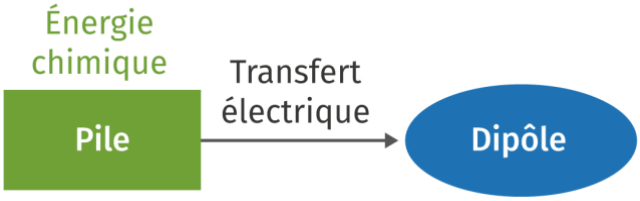
3. En 2017, le photovoltaïque a produit 9,2 TW·h d'énergie électrique contre 379,1 TW·h pour les centrales nucléaires. On peut en déduire que le photovoltaïque reste peu développé en France. Le nucléaire a fourni environ 40 fois plus d'énergie électrique que le photovoltaïque en 2017.

$$\frac{E_{\mathrm{n}}}{E_{\mathrm{p}}} = \frac{379,1}{9,2} = 41$$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

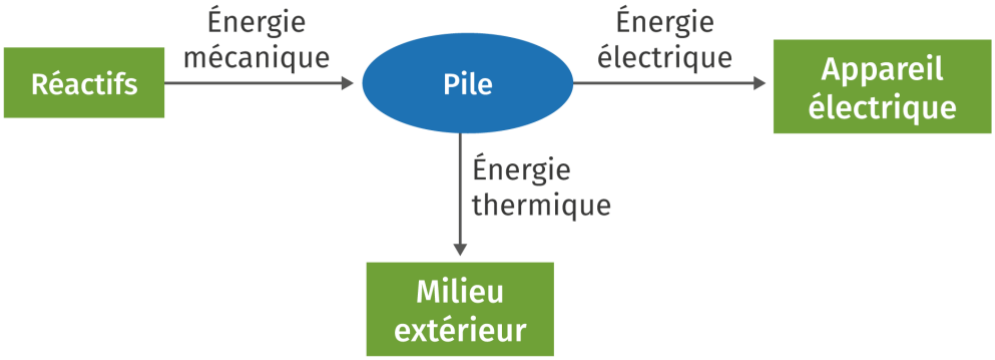
4. Chaîne énergétique associée aux piles :

Proposition 1 :



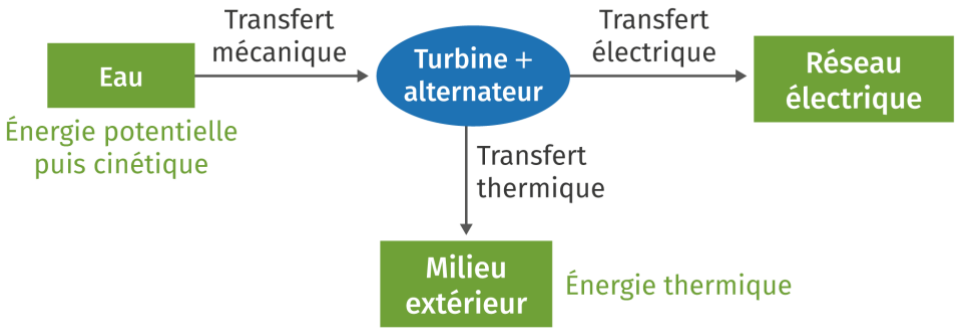
Proposition 2 :

Proposition 3 :



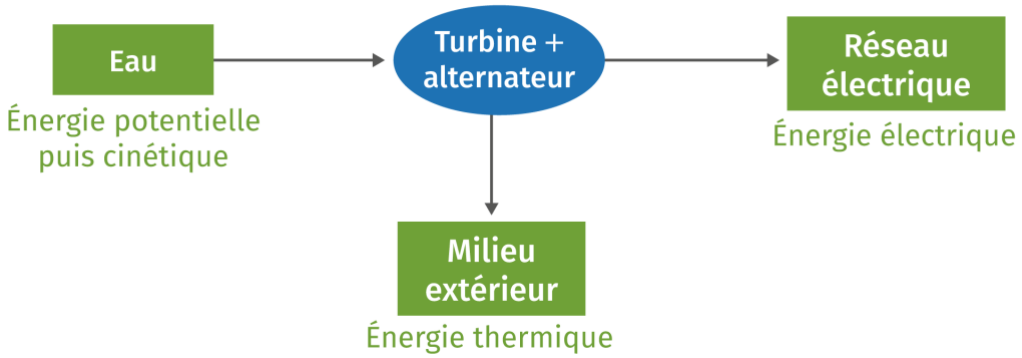
Chaîne énergétique associée à la centrale hydroélectrique :

Proposition 1 :

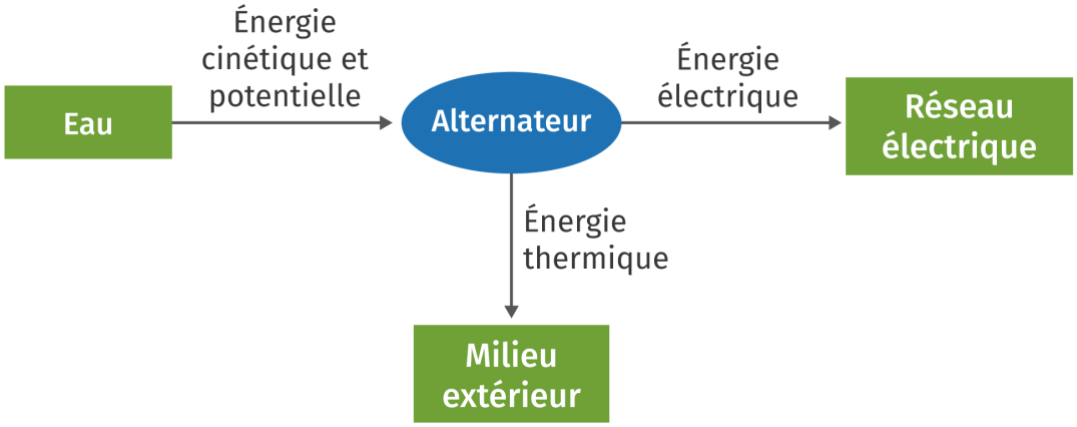


Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 2 :

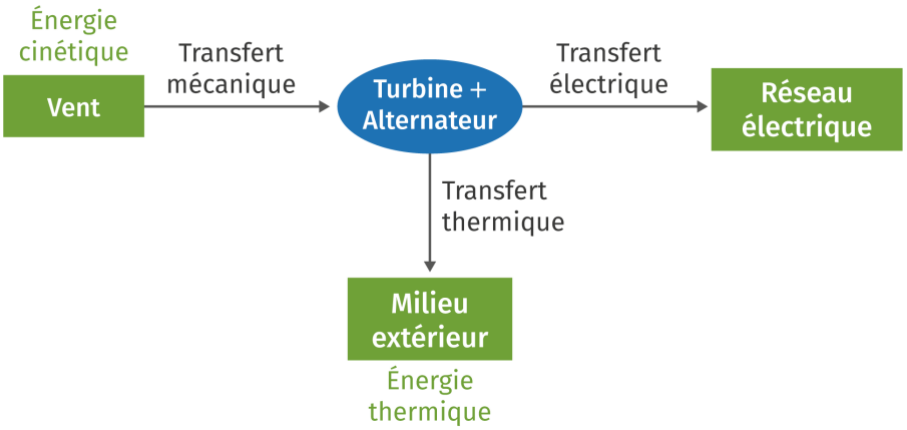


Proposition 3 :



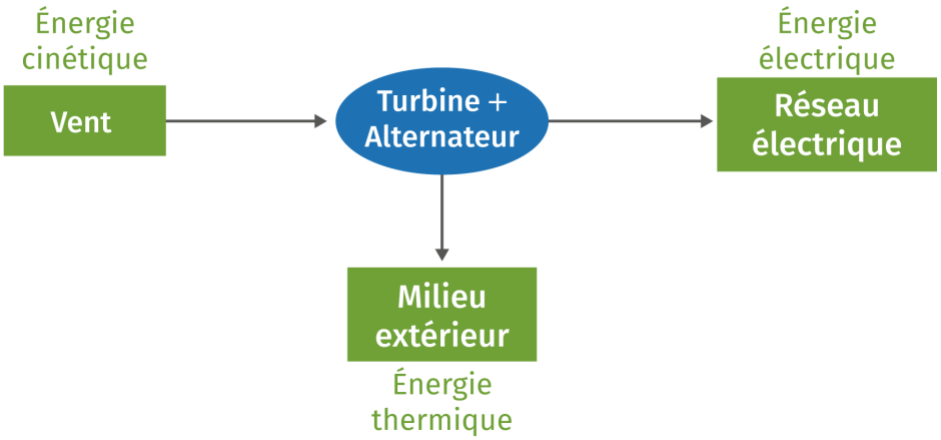
Chaîne énergétique associée à une éolienne (pour une hydrolienne l'eau remplace le vent) :

Proposition 1 :

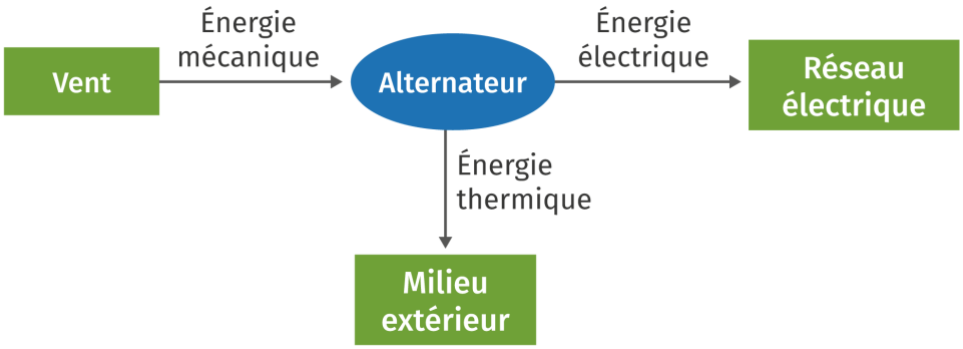


Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 2 :

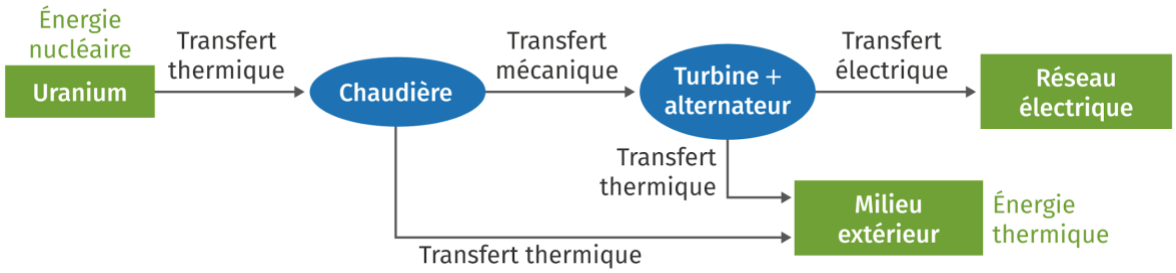


Proposition 3 :

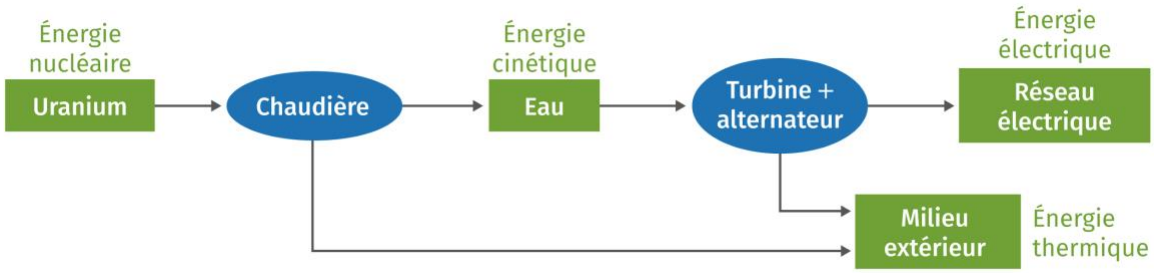


Chaîne énergétique associée à une centrale nucléaire :

Proposition 1 :

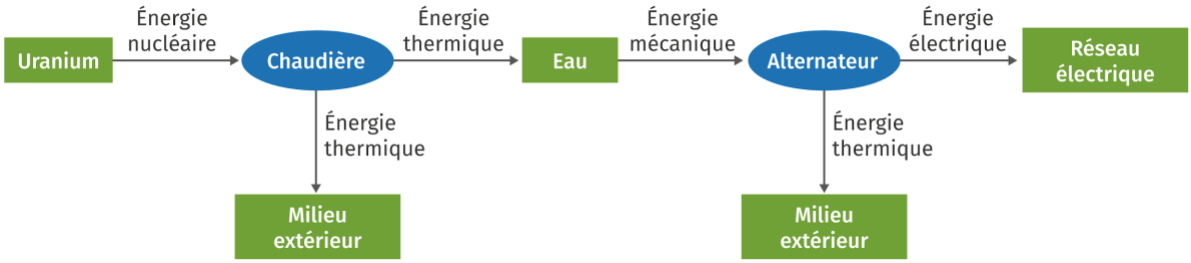


Proposition 2 :



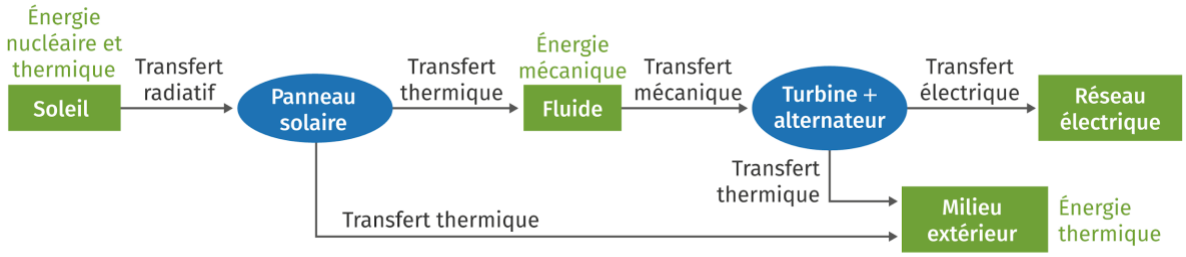
Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 3 :

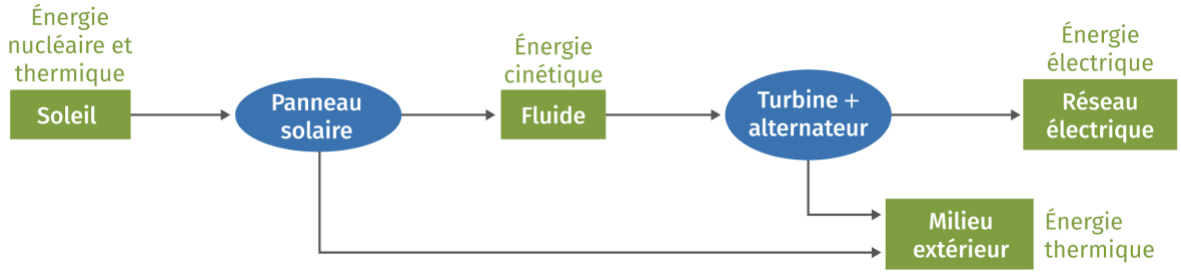


Chaîne énergétique associée à un panneau solaire thermique :

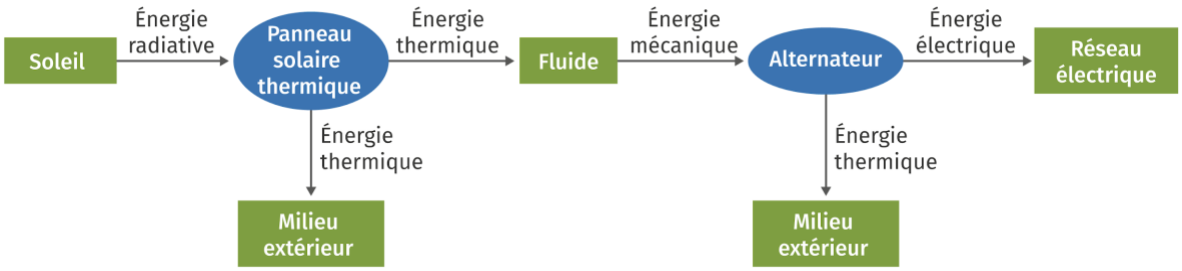
Proposition 1 :



Proposition 2 :



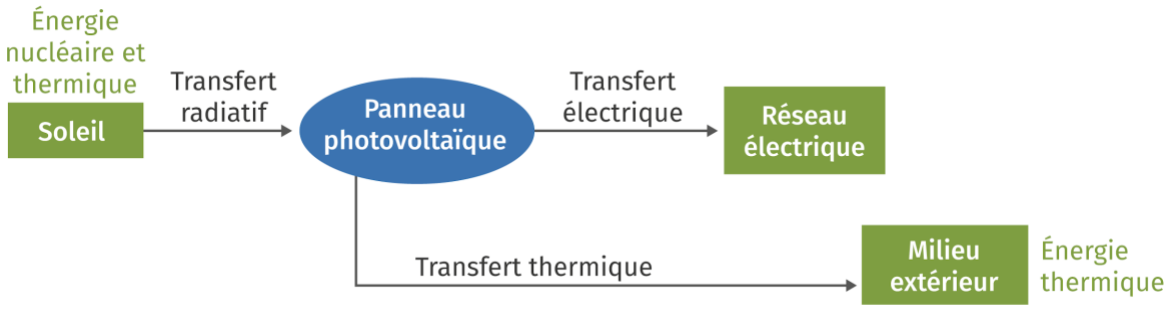
Proposition 3 :



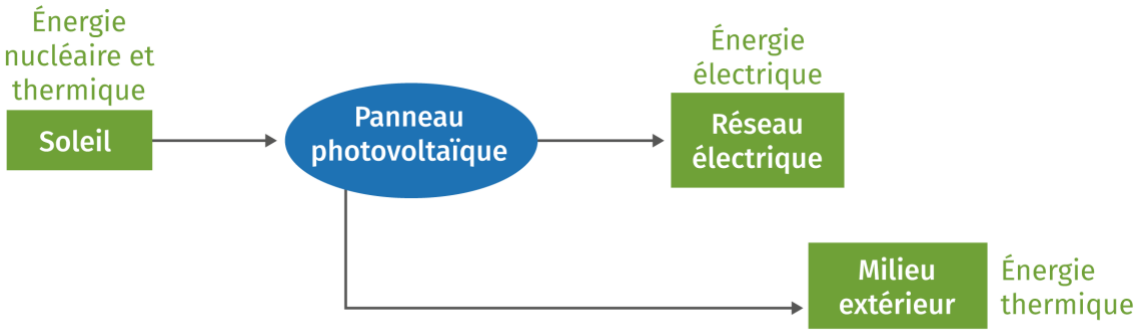
Document sous licence libre Creative Commons

Chaîne énergétique associée à un panneau photovoltaïque :

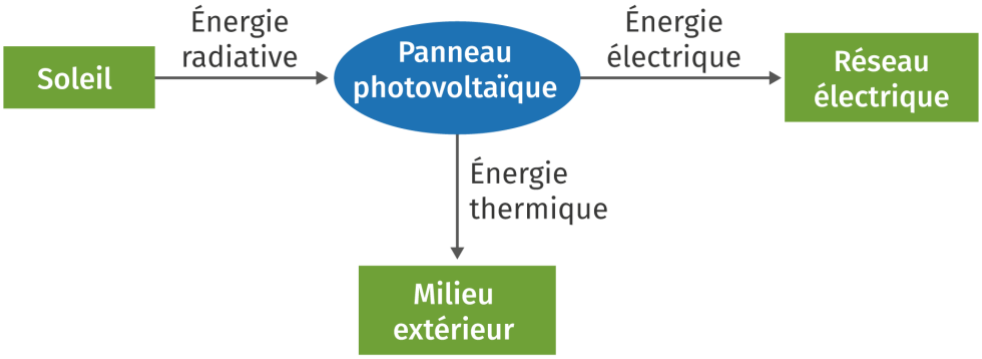
Proposition 1 :



Proposition 2 :



Proposition 3 :

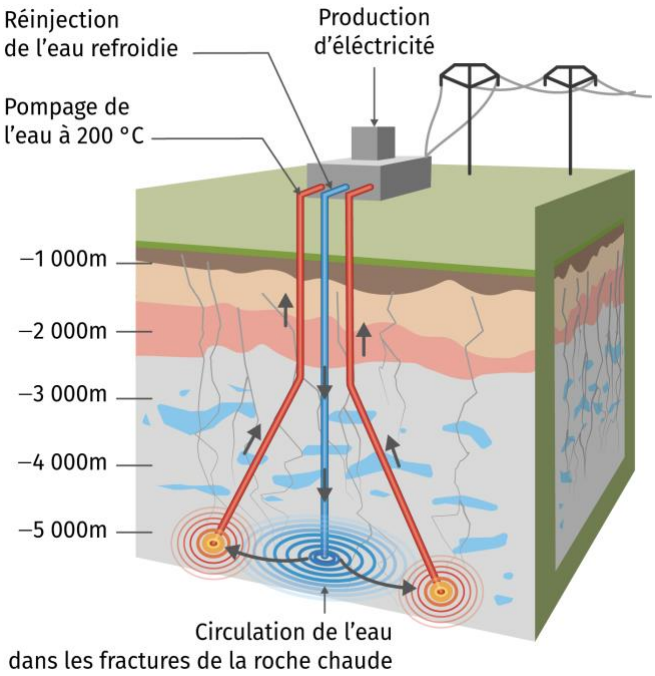


Document sous licence libre Creative Commons

Ressources complémentaires :

- Fonctionnement d'une centrale géothermique, à retrouver ci-dessous est en version numérique :

Géothermie



La température de la Terre augmente avec la profondeur, de l'ordre de 10 à 30 °C par kilomètre. C'est ce que l'on appelle le gradient géothermique. Il peut varier localement dans des zones géologiques très particulières, notamment les zones volcaniques. Dans le nord de l'Alsace, par exemple, il peut atteindre des valeurs de 100 °C par kilomètre. Cette chaleur issue du sol (la géothermie) est ensuite exploitée pour produire de l'électricité.
Deux moyens de faire tourner un système turbine/alternateur sont possibles selon les situations :
- s'il y a présence d'une poche d'eau, cette eau chaude peut être directement utilisée pour mettre en mouvement la turbine ;
- on peut aussi injecter de l'eau dans le sous-sol, qui va chauffer, puis mettre en mouvement la turbine.

- Un article de Planète énergies sur les différentes formes d'énergie : https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-formes-d-energie
- Deux vidéos pour comprendre comment le fonctionnement d'une centrale géothermique :
  - https://www.youtube.com/watch?v=ABp9A-ozlV4
  - https://www.youtube.com/watch?v=6gllq6oog2g

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité débat 2 : Production d'électricité : une solution idéale ? (p. 116-117)

Cette activité permet aux élèves de développer une méthode de recherche documentaire, pour se forger une opinion à partir de sources nombreuses et développer leur esprit critique. C'est la raison pour laquelle il est intéressant de rechercher les points positifs et négatifs pour toutes les méthodes employées aujourd'hui.
Les technologies actuelles pouvant évoluer au cours de la mise en œuvre de ce programme, l'idée est donc que les élèves puissent rechercher de nouvelles sources afin de compléter et actualiser eux-mêmes les informations de l'activité.

Lien avec le programme :

- Ces méthodes sans combustion ont néanmoins un impact sur l'environnement et la biodiversité ou présentent des risques spécifiques (pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels, etc.).
- Analyser des documents présentant les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques (métaux rares, etc.).

Objectifs méthodologiques :

- Rechercher des informations dans différents médias.
- Extraire et organiser l'information utile.
- Exercer son esprit critique, faire preuve de réflexion et de discernement.
- Formuler une opinion, prendre de la distance avec celle-ci, la confronter à celle d'autrui et en discuter.
- Définir et respecter une organisation et un partage des tâches dans le cadre d'un travail de groupe.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Apprécier la fiabilité des informations recueillies (EMI).

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Utilisation des ressources énergétiques pour la production d'électricité à l'échelle mondiale
Le premier graphique montre l'évolution de la production d'électricité dans le monde par rapport aux utilisations de ressources énergétiques. Le second graphique indique la répartition de ces ressources énergétiques pour produire de l'électricité en 2018.

Document 2 : Développement du photovoltaïque
Ce document est composé de deux articles du journal *Le Monde* sur l'implantation de centrales photovoltaïques dans l'Aude et dans l'Hérault.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Implantation d'une centrale hydroélectrique
Ce texte est extrait d'un article du journal *L'Expansion* sur l'implantation en Serbie d'une centrale hydroélectrique.

Document 4 : Terres rares
Ce texte est extrait du journal du CNRS et évoque l'exploitation et l'extraction des métaux rares.

Document 5 : Piles et environnement
Ce document discute du recyclage et de l'impact environnemental des piles.

Document 6 : Fukushima, l'après tsunami
Ce texte est extrait d'un article du journal *La Croix* sur les dangers environnementaux liés à l'accident nucléaire de Fukushima en 2011.

Réponses attendues aux questions :

Question préalable : Il n'y a pas de réponse spécifique attendue pour cette question. L'objectif est de faire émerger les conceptions initiales des élèves afin qu'ils les confrontent aux résultats de leurs recherches.

1. Depuis 1990, la production et donc la consommation d'énergie électrique a fortement augmenté. Elle a plus que doublé en 28 ans. D'après le second graphique, nous pouvons observer que l'essentiel de l'énergie électrique est produit à partir de sources fossiles (64 %). Seulement 36 % de la production d'électricité provient de sources renouvelables.

2. Liste non exhaustive :

	Avantages	Inconvénients
Piles classiques	• Petite taille	• Faible quantité d'énergie disponible • Pollution liée aux métaux
Pile à hydrogène	• Non polluante, car ne rejette que de l'eau	• Taille assez grande • Coût • Danger lié au dihydrogène • Production de dihydrogène assez énergivore
Centrale hydroélectrique	• Stockage d'une grande quantité d'énergie • Source d'énergie renouvelable	• Impact environnemental élevé • Modification de l'écosystème en amont et en aval • Pollution visuelle.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Éoliennes	• Source d'énergie renouvelable	• Pollution visuelle • Pollution sonore • Impact environnemental (béton, matériau) • Production intermittente
Hydroliennes	• Source d'énergie renouvelable	• Pollution visuelle • Pollution sonore • Impact environnemental (béton, matériau) • Production intermittente
Centrales nucléaires	• Grande quantité d'énergie électrique produite	• Pollution liée à la gestion des déchets • Danger lié à la radioactivité, notamment lors d'accidents industriels • Modification de l'écosystème
Panneaux solaires thermiques	• Source d'énergie renouvelable • Source d'énergie thermique	• Production intermittente • Pollution liée à l'extraction des composants
Panneaux photovoltaïques	• Source d'énergie renouvelable	• Production intermittente • Nécessite une installation pour modifier le courant continu en courant alternatif • Pollution liée à l'extraction des composant

3. Sans objet : création des groupes.

4. Sans objet : mise en commun des argumentaires.

5. Toutes les sources d'énergie ont des avantages et des inconvénients. Elles ont toutes un impact sur l'environnement, parfois indirect comme c'est le cas pour les ressources renouvelables. La compréhension des différentes technologies, ainsi que leurs impacts est un sujet scientifique. Cependant la problématique énergétique ayant un impact direct sur la vie des citoyens et l'environnement, elle constitue donc une question politique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 3 : Stockage de l'énergie (p. 118)

Le but de cette activité est de décrire trois moyens utilisés pour stocker l'énergie : la STEP, l'accumulateur et le supercondensateur.

Lien avec le programme :

- Pour faire face à l'intermittence liée à certains modes de production ou à la consommation, l'énergie électrique doit être convertie sous une forme stockable :
  - énergie chimique (accumulateurs) ;
  - énergie potentielle (barrages) ;
  - énergie électromagnétique (super-capacités).
- Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique).

Objectifs notionnels :

- Réaliser des chaînes de transformations énergétiques.
- Identifier les dispositifs permettant le stockage d'énergie.

Objectifs méthodologiques :

- Rechercher et extraire l'information utile.

Durée estimée : 30 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Principe de fonctionnement d'une STEP
Ce document allie un schéma de fonctionnement d'une STEP lors du stockage et déstockage d'énergie avec un texte explicatif sur le barrage de Grand Maison dans l'Isère.

Document 2 : Stockage à l'aide d'un accumulateur
Ce document présente le fonctionnement d'un accumulateur lors du stockage et du déstockage de l'énergie.

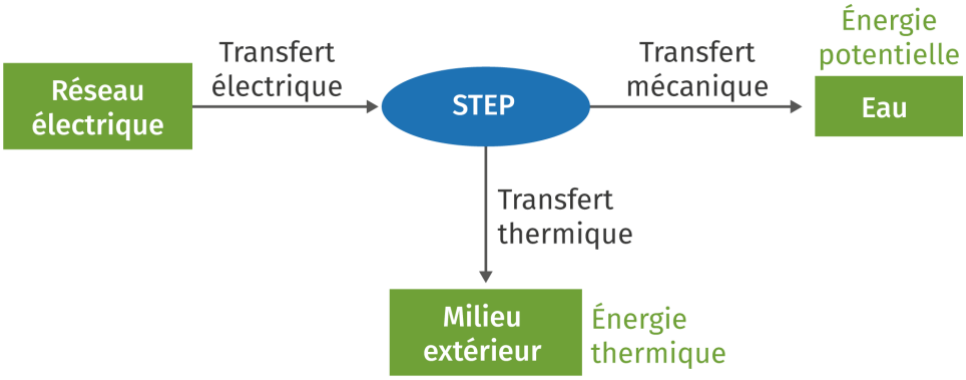
Document 3 : Stockage à l'aide d'un supercondensateur
Ce texte explique le principe de fonctionnement d'un supercondensateur en stockage et déstockage d'énergie. Le schéma de principe est à retrouver en version numérique sur LLS.fr/ESTstockage.

Réponses attendues aux questions :

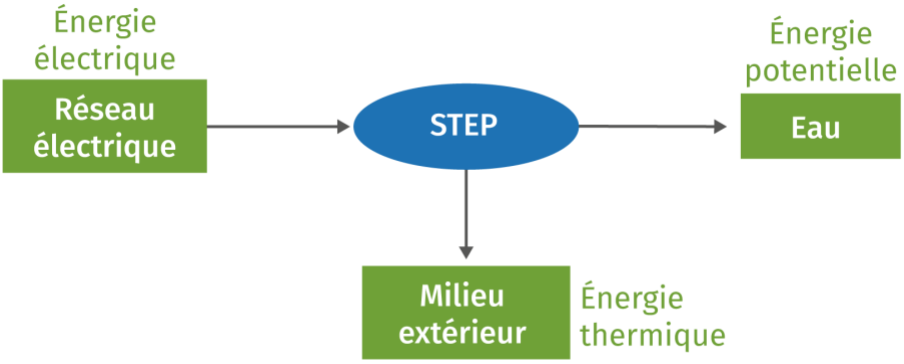
1. Dans une STEP, l'énergie est stockée sous la forme d'énergie mécanique (énergie potentielle de pesanteur). Dans un accumulateur, l'énergie est stockée sous la forme d'énergie chimique. Dans un supercondensateur, l'énergie est stockée sous la forme d'énergie électromagnétique.

Document sous licence libre Creative Commons

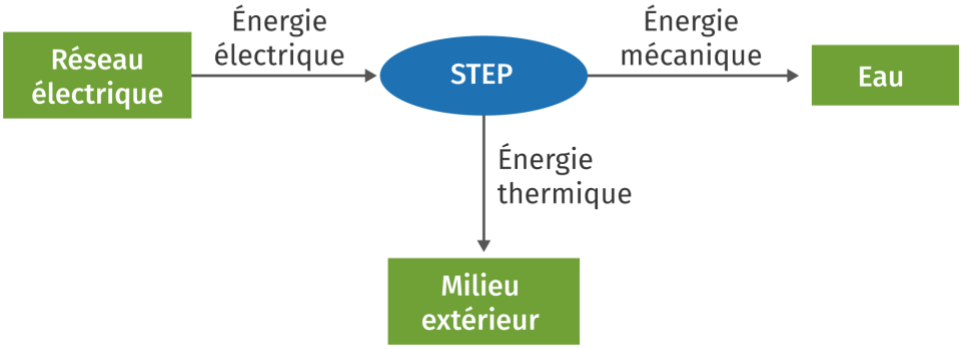
2. La chaîne énergétique correspondant au stockage d'énergie dans la STEP est :
Proposition 1 :



Proposition 2 :

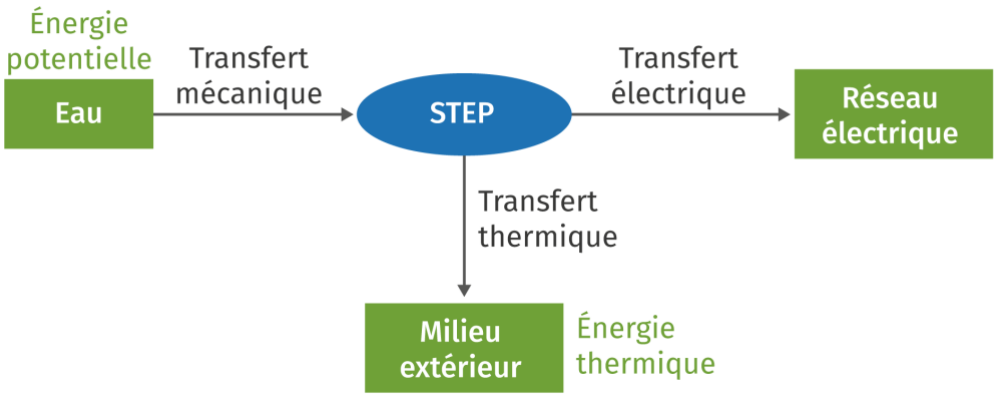


Proposition 3 :

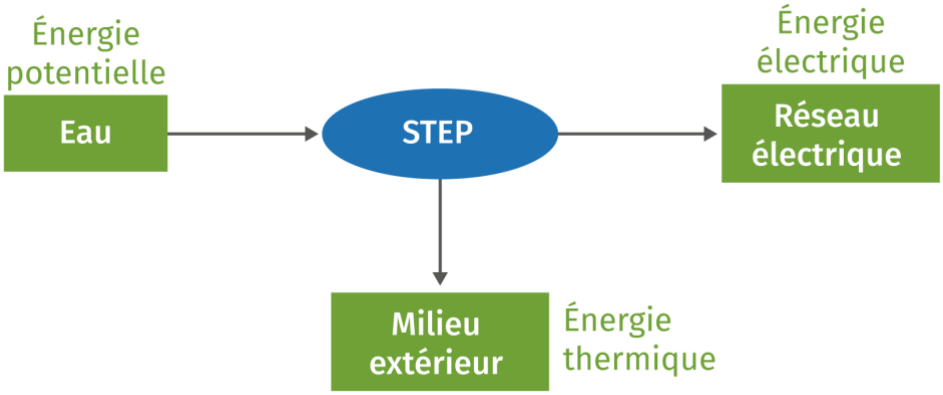


Document sous licence libre Creative Commons

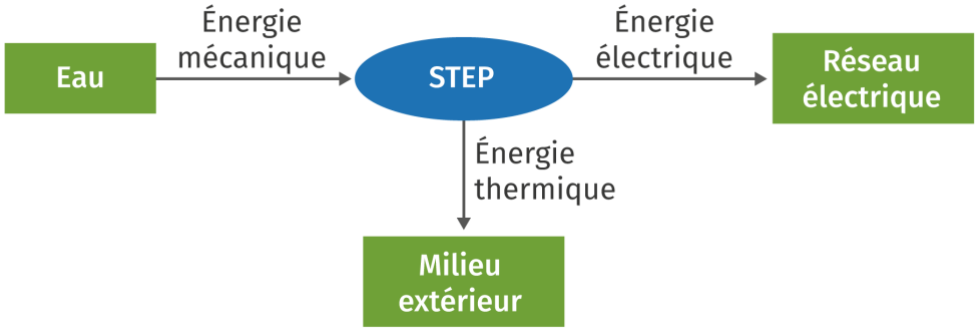
La chaîne d'énergie correspondant au déstockage d'énergie de la STEP est :
Proposition 1 :



Proposition 2 :



Proposition 3 :



Document sous licence libre Creative Commons

3.

	Avantages	Inconvénients
STEP	• Stockage d'une grande quantité d'énergie • Source d'énergie renouvelable	• Modification de l'écosystème en amont et en aval • Taille imposante de l'édifice • Coût de production élevé
Accumulateurs	• Petite taille	• Durée de vie limitée • Pollution liée à l'extraction des métaux les constituant
Supercondensateurs	• Petite taille • Durée de vie importante • Grande puissance énergétique par rapport à un accumulateur	• Coût assez élevé • Quantité d'énergie stockée par unité de masse inférieure à celle d'un accumulateur

Ressources complémentaires :

- Un article de la Commission de régulation de l'énergie sur le stockage de l'électricité : http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=stockage-technologies
- Un article de la revue *Sortir du nucléaire* sur le stockage de l'énergie électrique : https://www.sortirdunucleaire.org/Le-stockage-de-l-energie-electrique-Pourquoi-est
- Un article de *Futura sciences* sur le projet Energy Vault : https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-stockage-energie-invention-geniale-startup-suisse-73877/
- Un dossier de Planète énergies intitulé « Comment stocker l'électricité ? » : https://www.planete-energies.com/fr/medias/dossiers/comment-stocker-l-electricite
- Une série de vidéos du CEA dans la série ScienceLoop :
  épisode 1 :
  https://www.youtube.com/watch?v=VQyooUrr5B8&list=PLLKquSi64nRatXwGz1vJeJo02wXIPRxIA&index=2
  épisode 2 :
  https://www.youtube.com/watch?v=n4PzfIXG3Rk&list=PLLKquSi64nRatXwGz1vJeJo02wXIPRxIA&index=1
  épisode 3 :
  https://www.youtube.com/watch?v=Ln7m3_mquY0&list=PLLKquSi64nRatXwGz1vJeJo02wXIPRxIA&index=1

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 4 : Énergie stockée dans un barrage (p. 119)

Cette activité permet d'étudier une chaîne énergétique complète en partant de l'eau du barrage pour aller jusqu'à l'appareil électrique, et donc de calculer le rendement global du système. Chaque conversion énergétique entraîne des pertes plus ou moins importantes, les rendements des dispositifs ne sont pas égaux à 1.

Lien avec le programme :

- Décrire des exemples de chaînes de transformations énergétiques permettant d'obtenir de l'énergie électrique à partir de différentes ressources primaires d'énergie.
- Calculer le rendement global d'un système de conversion d'énergie.

Objectifs notionnels :

- Réaliser des chaînes de transformations énergétiques.
- Calculer le rendement global d'un système de conversion d'énergie.
- Calculer différentes formes d'énergie.
- Identifier les sources de pertes énergétiques.

Objectifs méthodologiques :

- Extraire et organiser l'information utile.
- Utiliser le calcul littéral.
- Exprimer une grandeur physique dans son unité adaptée.
- Mettre en œuvre un raisonnement.

Durée estimée : 30 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Batterie d'un smartphone
Ce document illustre une batterie de smartphone et ses valeurs nominales. Le texte donne des précisions sur les batteries lithium-ion (durée de vie, densité énergétique, rendement).

Document 2 : Production d'électricité
Ce texte donne des informations sur le barrage hydroélectrique de Hoover au Canada.

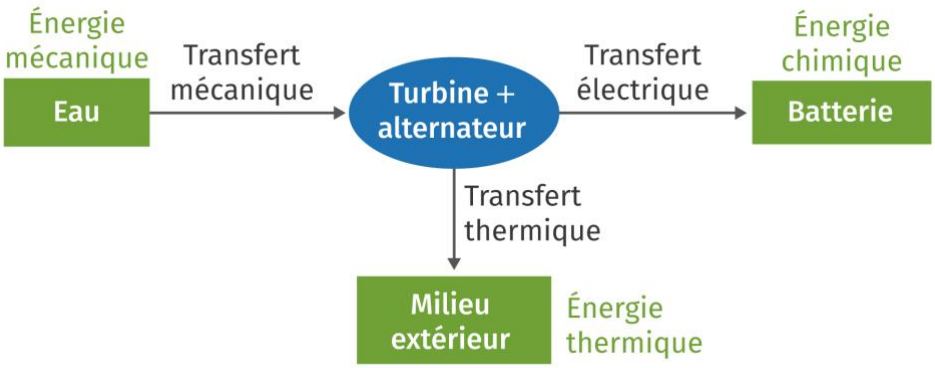
Document 3 : Transport de l'énergie électrique
Ce texte évoque le transport de l'énergie électrique des centrales aux utilisateurs.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

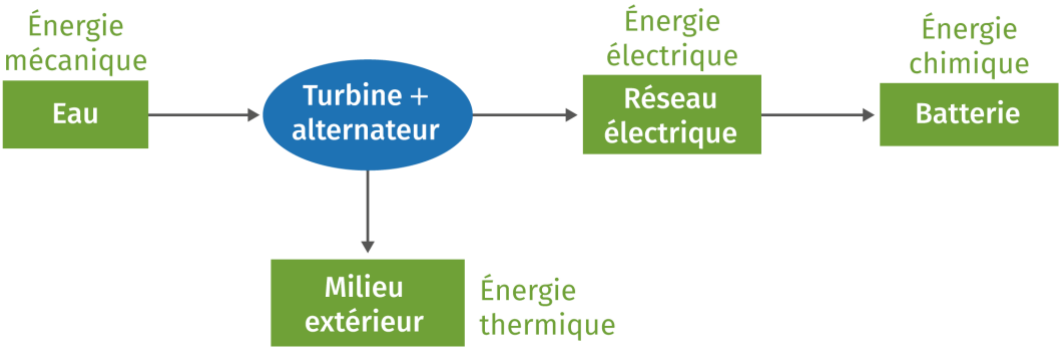
Réponses attendues aux questions :

1. L'énergie nécessaire pour remplir complètement la batterie du smartphone est :
$E_{\text{el}} = 11,40\ \text{W} \cdot \text{h}$ soit $E_{\text{el}} = 11,40 \times 3\ 600 = 41,04 \times 10^3\ \text{J} = 41,04\ \text{kJ}$

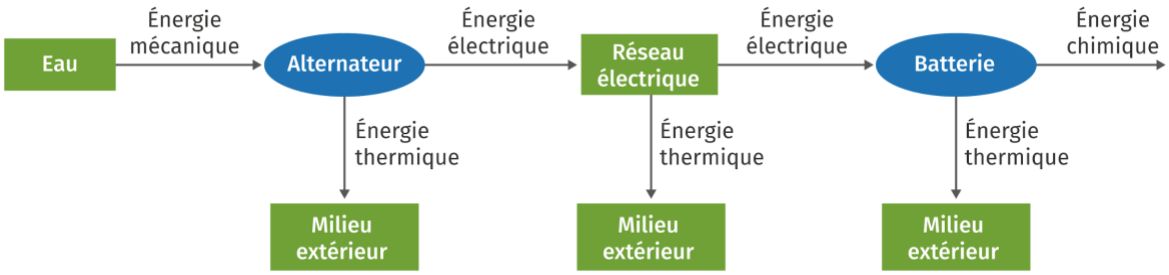
2. La chaîne énergétique de l'ensemble du parcours de l'énergie du barrage à la batterie est :
Proposition 1 :



Proposition 2 :



Proposition 3 :



3. Les pertes énergétiques au niveau de la centrale hydroélectrique viennent de l'alternateur (pertes thermiques) et des frottements de l'eau sur la conduite forcée.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

4. Le rendement de la centrale hydraulique est :

$$r_{\text{centrale}} = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{2\ 080}{3\ 600 - 1\ 270 - 60} = 0,92 = 92\ \%$$

Remarque : il faut penser à ne compter que l'énergie mécanique qui a été réellement fournie à l'alternateur, et donc tenir compte de l'énergie mécanique à la sortie du barrage.

5. Le rendement global du système est :

$$r = r_{\text{centrale}} \cdot r_{\text{transport}} \cdot r_{\text{batterie}} = 0,92 \times 0,94 \times 0,90 = 0,78 = 78\%$$

6. L'énergie prélevée dans l'eau du barrage pour recharger la batterie est :

$$E_{\text{fournie}} = \frac{E_{\text{utile}}}{r} = \frac{41,04}{0,78} = 53\ \text{kJ}$$

Ressources complémentaires :

- Un article sur le rendement et les pertes sur le réseau électrique : https://www.picbleu.fr/page/electricite-rendement-et-pertes-sur-le-reseau
- Un article de Planète énergies sur le rendement, la puissance et la mesure de l'énergie : https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-energie-rendement-puissance-et-mesure

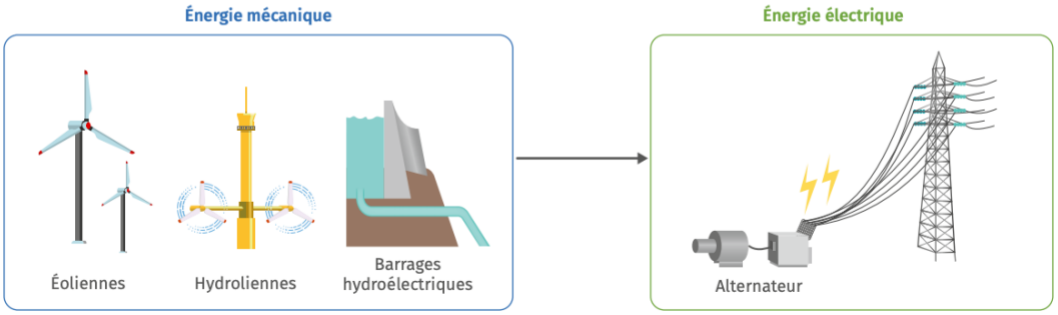
Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Bilan (p. 121)

Production d'électricité

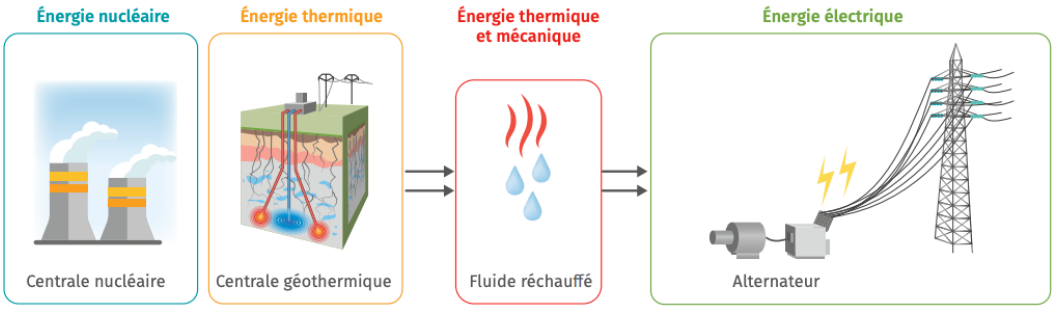
CONVERSION DIRECTE D'ÉNERGIE MÉCANIQUE

Au sein d'éoliennes, d'hydroliennes ou de barrages hydroélectriques, des turbines mettent en mouvement un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique



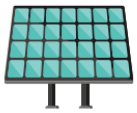
CONVERSION INDIRECTE D'ÉNERGIE MÉCANIQUE

Dans les centrales nucléaires ou géothermiques, un fluide réchauffé met en mouvement une turbine qui entraine un alternateur



CONVERSION D'ÉNERGIE CHIMIQUE

CONVERSION DIRECTE D'ÉNERGIE RADIATIVE



Stockage d'énergie

Document sous licence libre Creative Commons

Exercices

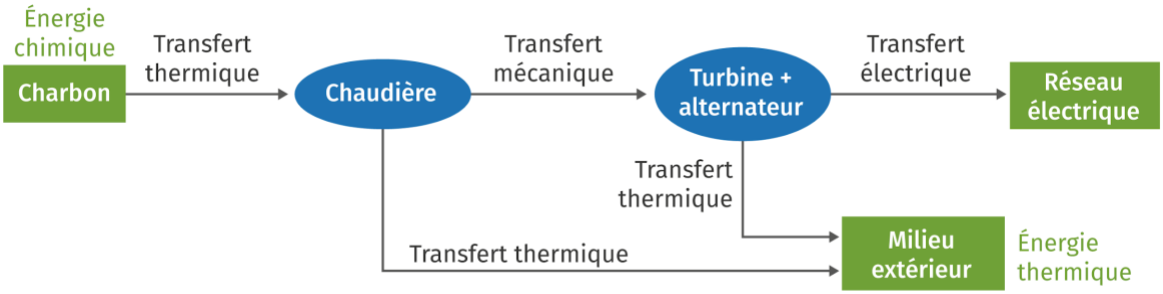
Zone d'échauffement (p. 122)

1. Rendement global.

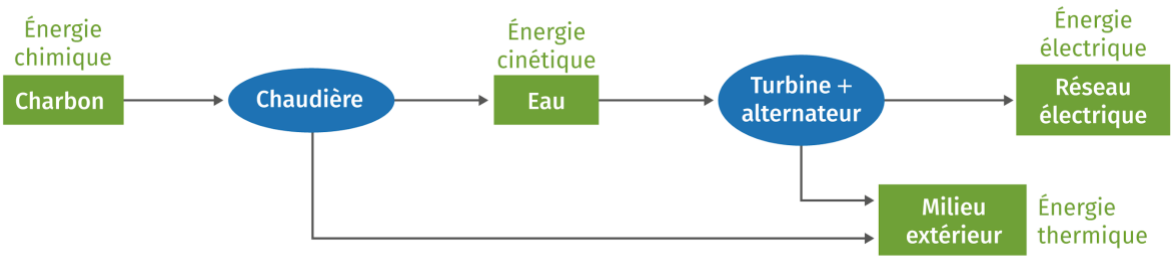
Le rendement global des conversions d'énergie de l'uranium à l'eau de la bouilloire est égal au produit des rendements des différents convertisseurs soit :
$r = 0,30 \times 0,94 \times 0,85 = 0,24 = 24\%$.

2. Centrales à charbon.

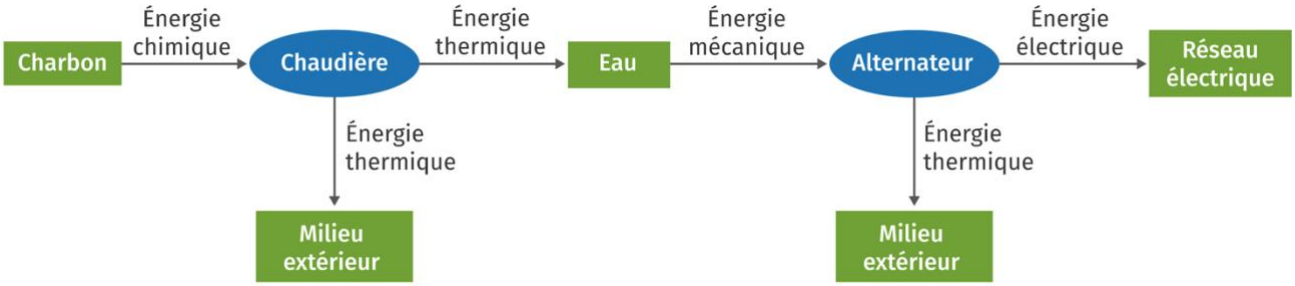
Proposition 1 :



Proposition 2 :



La chaîne énergétique des conversions et des transferts qui s'effectuent du charbon au réseau électrique est :



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

3. Extraction du gaz de schiste.

a. Une raison économique pour laquelle le gaz de schiste n'était pas très exploité réside dans la complexité de l'extraction et la nécessité des moyens techniques assez coûteux. Une raison écologique est que la technique employée peut entraîner une pollution des nappes phréatiques.

b. Le gaz de schiste commence tout de même à être exploité, car il constitue une source d'énergie fossile. Or, ces sources sont de moins en moins disponibles sur notre planète.

4. Présenter les deux moyens d'obtention de l'énergie électrique autre que l'alternateur.

La pile électrochimique et les panneaux photovoltaïques sont les dispositifs permettant d'obtenir de l'énergie électrique. Les piles électrochimiques permettent de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. Les panneaux photovoltaïques permettent de convertir l'énergie radiative (ou lumineuse) en énergie électrique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 123)

4. Les métaux rares, des métaux très utiles

Compétence principalement travaillée : Analyser des documents présentant les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques

Correction :

1. Ces métaux étaient qualifiés de rares, car ils étaient initialement considérés comme peu abondants. Cependant, en réalité il sont aussi abondants que le cuivre ou le nickel, donc ils ne sont pas si rares que cela.

2. Les minerais dont sont extraits ces métaux sont des mélanges de lanthanides et ont des propriétés physico-chimiques très proches, ce qui rend difficile les procédés de séparation chimique. Cet extraction s'effectue très majoritairement en Chine.

3. Les métaux rares sont utilisés dans les aimants pour leurs propriétés magnétiques ou dans les DEL pour leurs propriétés optiques.

4. Le principal problème de l'exploitation de ces métaux rares, outre les procédés complexes mis en jeu, est la pollution que cela engendre (rejets, d'acides, de bases, de métaux lourds ou de déchets radioactifs).

5. Un comportement à adopter pour réduire la quantité de métaux rares à extraire est le recyclage de ces derniers.

Suggestion de questions supplémentaires :

6. **Donner cinq exemples de terres rares avec leur symbole.**
Les terres rares sont le scandium (Sc), l'yttrium (Y), le lanthane (La), le cérium (Ce), le praséodyme (Pr), le néodyme (Nd), le prométhium (Pm), le samarium (Sm), l'europium (Eu), le gadolinium (Gd), le terbium (Tb), le dysprosium (Dy), l'holmium (Ho), l'erbium (Er), le thulium (Tm), l'ytterbium (Yb) et le lutécium (Lu).

6. **Comment évolue la production mondiale de métaux rares depuis 1994 ? Proposer une explication.**
Globalement, entre 1994 et 2017, la production de métaux a fortement augmenté, elle a plus que doublé. Cela est dû à la hausse de la production de DEL qui sont favorisées pour les éclairages, car peu consommatrices d'énergie électrique.

Sources/Bibliographie :

- « Les terres rares, et après ? », CNRS le journal : https://lejournal.cnrs.fr/billets/les-terres-rares-et-apres
- Des définitions de « terres rares » :
  - https://fr.wikipedia.org/wiki/Terre_rare
  - https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-terre-rare-1647/
- Une émission de France Culture sur les terres rares : https://www.franceculture.fr/sciences/les-terres-rares-en-cartes-et-dans-la-presse-un-marche-strategique

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Un article sur les terres rares en Chine : https://www.connaissancedesenergies.org/les-terres-rares-et-la-chine-la-notion-de-criticite-en-question-190124
- « Les terres rares qu'est-ce-que c'est ? », *Géo*, 2014 : https://www.geo.fr/environnement/definition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433
- Un article de *Futura Sciences* sur les terres rares et leurs utilisations : https://www.futura-sciences.com/planete/photos/geologie-merveilleuses-terres-rares-leur-utilisation-1323/

5. Usine marémotrice

Compétence principalement travaillée : Décrire des chaînes de transformation énergétique

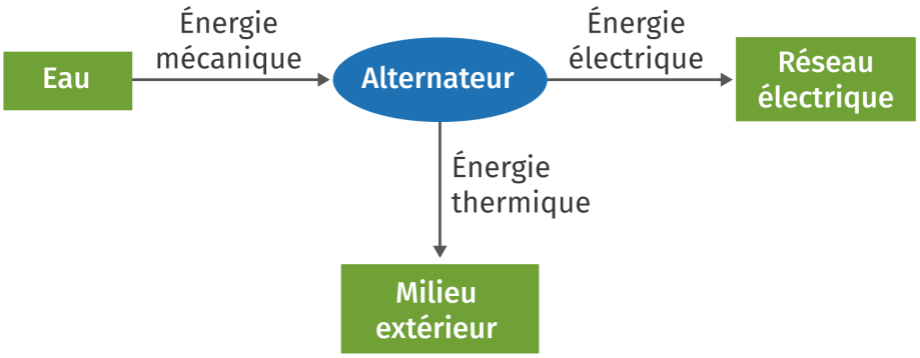
Correction :

1. La puissance électrique totale maximale de cette centrale est : $P_{\max} = 24 \times 10 = 240\ \mathrm{MW}$.

2. Le barrage perd 1% de sa capacité par an du fait de son envasement. Des végétaux peuvent s'emmêler dans les turbines et les ralentir. De plus, la puissance électrique produite dépend de la puissance de la marée. La puissance mécanique fournie à l'alternateur par l'eau peut être moindre et donc entraîner une puissance électrique plus faible.

3. L'avantage de l'utilisation des marées pour produire de l'énergie électrique est qu'il s'agit d'une source d'énergie renouvelable.

4. La chaîne énergétique liée à cette usine est :



5. La construction d'une usine marémotrice peut provoquer des modifications de l'écosystème (hausse de la température de l'eau, pollution du sol à cause des travaux, assèchement lors de la construction). Autre inconvénient, cette forme d'énergie est intermittente.

Sources/Bibliographie :

- Un article de Planète énergies sur l'énergie marémotrice : https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-energie-maremotrice
- Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables : http://ats.energies.free.fr/spip.php?article24

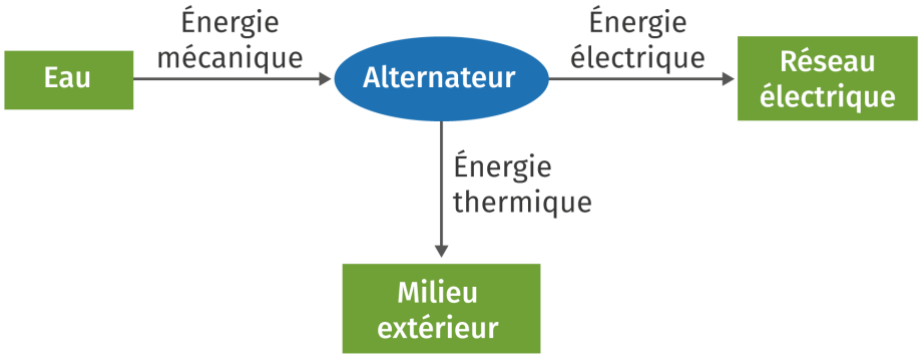
Document sous licence libre Creative Commons

- L'usine marémotrice de la Rance :
  - https://fr.wikipedia.org/wiki/Usine_mar%C3%A9motrice_de_la_Rance
  - https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre
- Un focus de Total sur l'énergie marémotrice : https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/focus-sur-l-energie-maremotrice

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Décrire des chaînes de transformation énergétique

1. Représenter la chaîne énergétique de l'usine marémotrice.
La chaîne énergétique liée à cette usine est :



2. Calculer la puissance maximale de l'installation.
La puissance maximale de l'installation est : $P_{\text{max}} = 24 \times 10 = 240 \text{ MW}$.

3. La production d'énergie électrique annuelle moyenne de ce site est d'environ 500 GW·h. Calculer la puissance moyenne de l'installation.
La puissance moyenne de l'installation est :

$$P_{\text{moy}} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{500}{365,25 \times 24} = 0,057\ 5 \text{ GW} = 57,5 \text{ MW}$$

4. Calculer le rendement moyen de l'installation.
Le rendement moyen de l'installation est : $r = \frac{P_{\text{moy}}}{P_{\text{max}}} = \frac{57,5}{240} = 0,240 = 24,0\ \%$

5. Lister les avantages et les inconvénients d'une telle solution de production d'électricité.

Avantages	Inconvénients
• ressource énergétique renouvelable inépuisable • peu soumise aux aléas climatiques • ne produit pas de gaz à effet de serre	• coût de production de l'usine élevé • engendre des nuisances • modifie l'écosystème en amont et en aval du barrage • production intermittente

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 124-125)

6. Pile à combustible

Compétence principalement travaillée : Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères

Correction :

1. Les réactifs dans une pile à combustible sont le dihydrogène $H_2(g)$ et le dioxygène $O_2(g)$ issu de l'air. Le seul produit formé est l'eau $H_2O(l)$.

2. L'avantage de ce type de pile à combustible est qu'elle ne rejette que de l'eau, donc elle ne pollue pas lors de son utilisation. De plus, elle ne se détériore pas, car l'apport de dihydrogène s'effectue par l'extérieur de la pile avec un apport d'une bouteille pressurisée.

Suggestion de questions supplémentaires :

3. **En déduire l'équation-bilan ajustée de fonctionnement de la pile à combustible.**
L'équation bilan de fonctionnement de la pile à combustible est :
$$2\ H_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2\ H_2O(g)$$

4. **Quels sont les inconvénients d'une pile à combustible ?**
Une pile à combustible a tout de même un impact écologique lors de sa fabrication. Mais le dihydrogène doit surtout être synthétisé pour alimenter la pile et cela nécessite plus d'énergie que ce que peut fournir la pile. Il peut aussi être produit par électrolyse de l'eau, mais c'est très énergivore. D'autres inconvénients sont la pollution entraînée lors de la synthèse à partir d'hydrocarbures, avec rejets de gaz à effets de serre, mais aussi le caractère très explosif de ce gaz. De plus, la taille de ces dispositifs reste également un frein à leur utilisation.

Sources/Bibliographie :

- Un article sur les piles à combustible : https://www.ecosources.info/dossiers/439-la-pile-a-combustible
- Un article du CEA sur l'hydrogène et la pile à combustible : http://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energies-renouvelables/recherches-CEA-hydrogene-pile-a-combustible.aspx
- Une vidéo du CEA qui présente le fonctionnement d'une pile à combustible : http://www.cea.fr/multimedia/pages/animations/energies/fonctionnement-pile-a-combustible.aspx
- Une autre vidéo du CEA sur la pile à combustible : http://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/videos/energies/mobilite-electrique-pile-a-combustible.aspx

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

7. Le nucléaire entre danger et sécurité

Compétence principalement travaillée : Extraire des informations du document.

Correction :

1. Les deux principaux intérêts d'une centrale nucléaire sont :
   - la production d'une grande quantité d'énergie électrique ;
   - le dégagement d'une faible quantité de dioxyde de carbone.

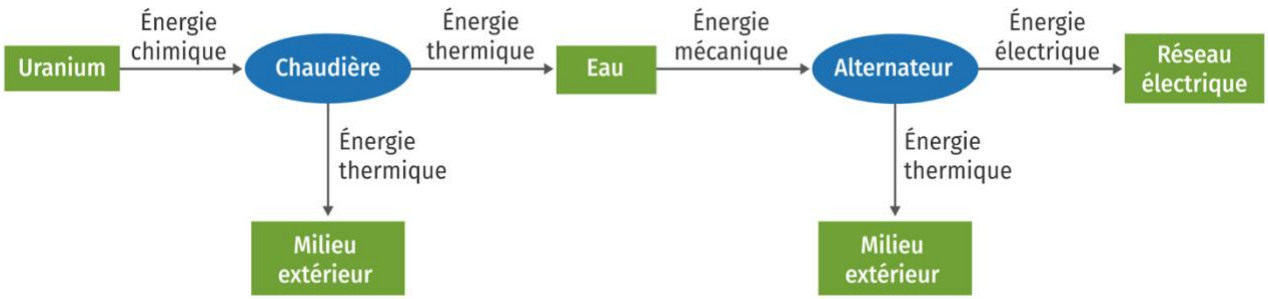
2. Les conséquences de l'exposition à des rayonnements radioactifs vont de la brûlure aux cancers. Cela peut atteindre les systèmes nerveux, digestifs, reproductifs, etc.

3. La dose moyenne annuelle d'exposition aux rayonnements d'origine naturelle en France est de 2,4 mSv. Celle occasionnée par les rejets des centrales nucléaires est de 2 µSv (0,002 mSv).

4. Les trois dispositifs de sécurité mis en place dans une centrale nucléaire sont :
   - une enveloppe étanche pour entourer les barres d'uranium ;
   - une enveloppe en acier inoxydable très épais autour du circuit primaire ;
   - une enceinte de confinement constituée d'une ou deux parois en béton armé revêtu d'une peau interne en acier.

Suggestion de questions supplémentaires :

5. **Réaliser la chaîne énergétique associée à une centrale nucléaire.**



6. **Rechercher les inconvénients de l'utilisation d'une centrale nucléaire.**
Le plus gros inconvénient des centrales nucléaires est la gestion des déchets radioactifs. De plus, la construction d'un tel site modifie l'équilibre de l'écosystème où il est implanté. Finalement, il existe aussi un risque d'accident industriel.

7. **La France a fait le choix du nucléaire depuis plus de 50 ans alors que la production mondiale d'électricité est surtout issue du thermique à flammes. Pourquoi ?**
La France a fait le choix du nucléaire pour ne pas trop dépendre des pays producteurs de pétrole. La France disposant peu de cette ressource, elle est obligée de l'importer. Ce sont donc surtout pour des considérations économiques et souveraines.

8. **La France a aussi fait le choix de limiter le nucléaire à 50 % après la présentation du Plan Climat à l'horizon 2025. Quelles seront les technologies développées pour produire l'électricité ?**
La France a fait le choix de développer les énergies renouvelables comme le photovoltaïque, l'éolien, l'hydroélectrique, etc.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Sources/Bibliographie :

- EDF, « Qu'est-ce-que l'énergie nucléaire ? » : https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-nucleaire
- Un dossier du CEA pour découvrir et comprendre l'énergie nucléaire : http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energie-nucleaire.aspx
- Les mesures du gouvernement français pour réduire la part du nucléaire dans la production d'énergie : https://www.gouvernement.fr/des-mesures-pour-reduire-la-part-du-nucleaire-a-50-a-l-horizon-2025
- Un dossier sur la radioprotection sur le site de l'Institut de la radioprotection et de la sûreté nucléaire : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/Pages/Home.aspx

8. Différents systèmes de stockage

Compétence principalement travaillée : Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères

Correction :

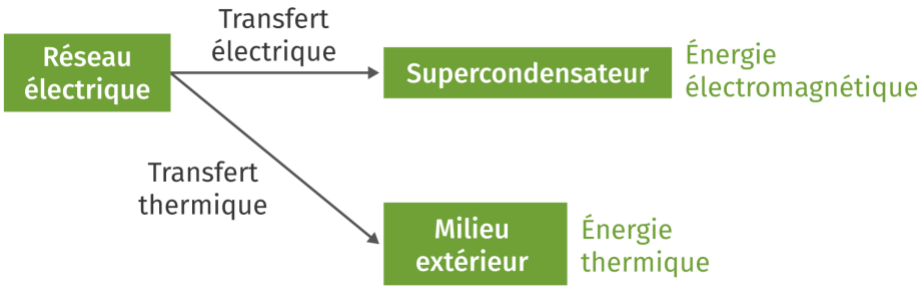
1. L'intérêt des supercondensateurs pour les bus de ville est de fournir une grande puissance utile sur une courte durée lors des démarrages fréquents par rapport aux batteries lithium-ion. De plus, lors des freinages, ils peuvent convertir une partie de l'énergie cinétique en énergie électromagnétique. Leur rendement, ainsi que leur durée de vie, sont plus importants que ceux des batteries lithium-ion.

2. Les batteries lithium-ion sont intéressantes, car elles sont de petites tailles et ont une grande densité d'énergie.

3. L'extraction du lithium pose aussi des problèmes :
   - grande consommation d'eau ;
   - possibilité de fuites de produits toxiques ;
   - diminution des ressources en lithium ;
   - conditions de travail ;
   - exploitations des enfants ;
   - etc.

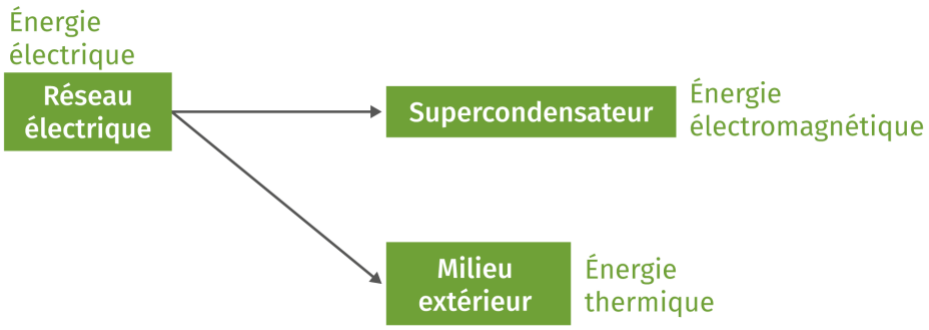
Suggestion de questions supplémentaires :

4. **Réaliser la chaîne énergétique associée à la charge d'un supercondensateur.**
Proposition 1 :

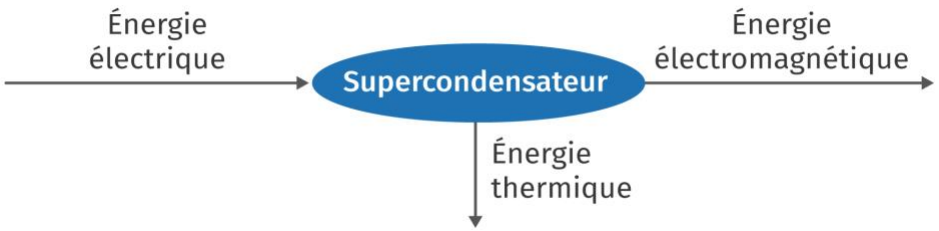


Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 2 :

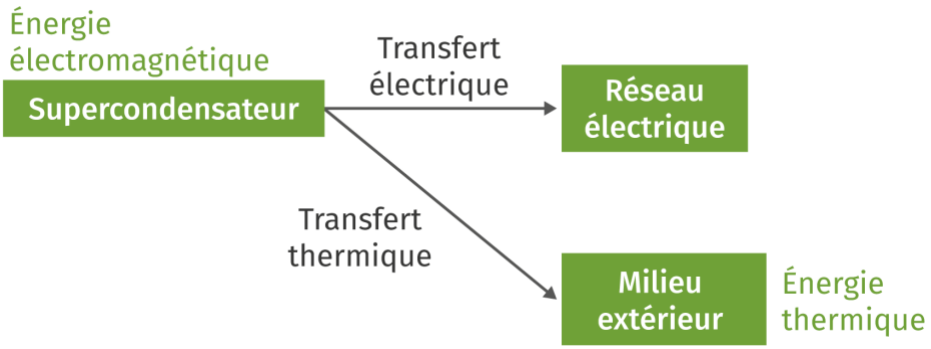


Proposition 3 :

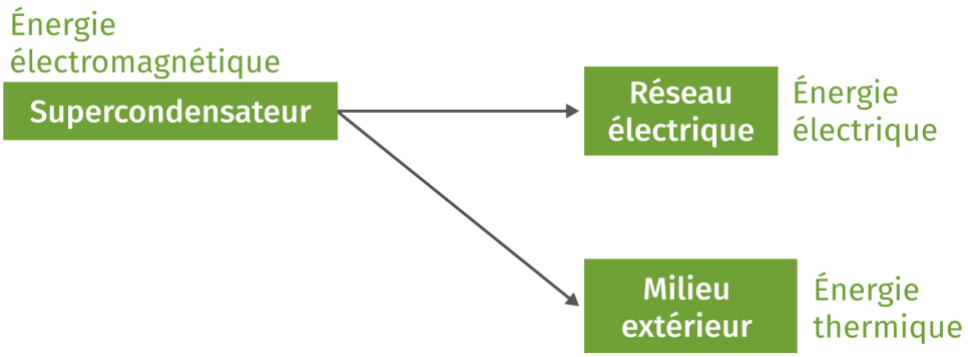


5. Réaliser la chaîne énergétique associée à la décharge d'un supercondensateur.

Proposition 1 :

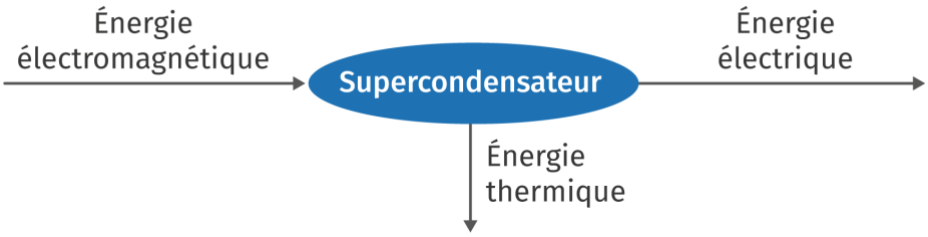


Proposition 2 :



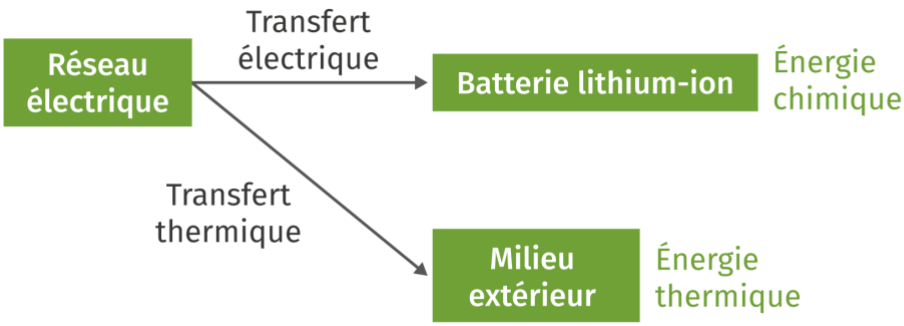
Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 3 :

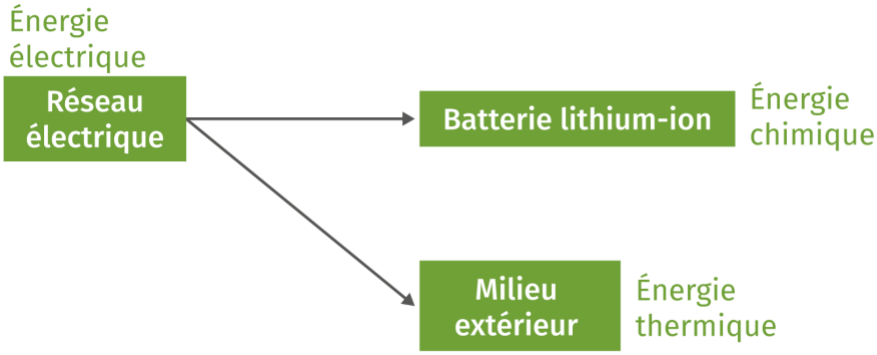


6. Réaliser la chaîne énergétique associée à la charge d'une batterie lithium-ion.

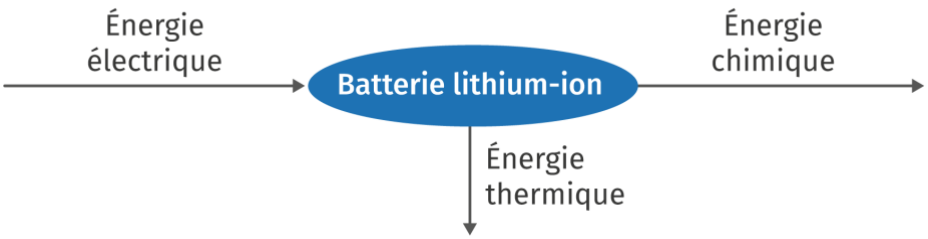
Proposition 1 :



Proposition 2 :



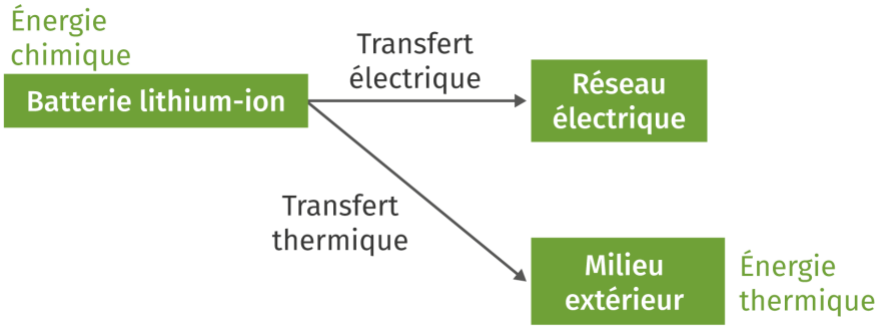
Proposition 3 :



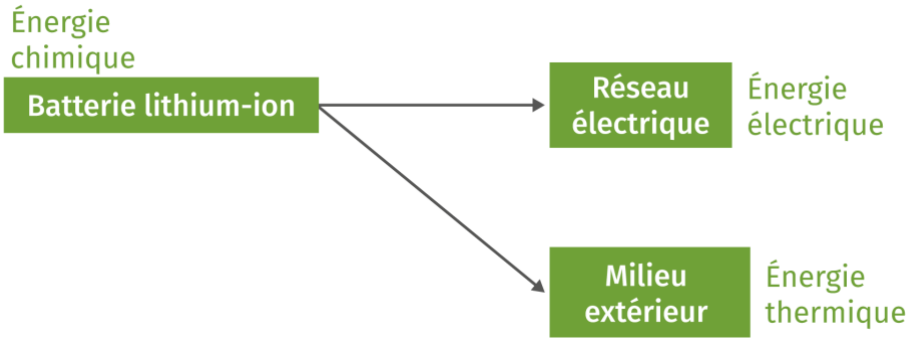
Document sous licence libre Creative Commons

7. Réaliser la chaîne énergétique associée à la décharge d'une batterie lithium-ion.

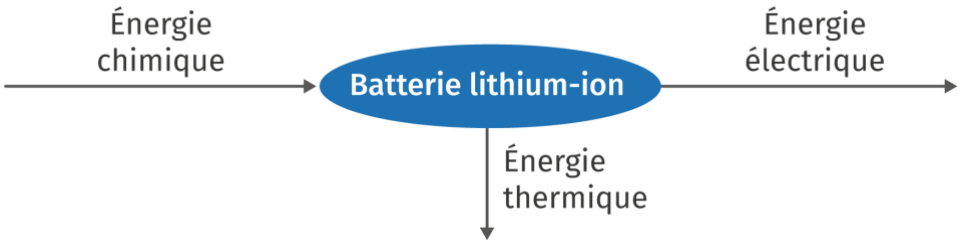
Proposition 1 :



Proposition 2 :



Proposition 3 :



Sources/Bibliographie :

- Des supercondensateurs silicium ultrastables, haute performance et flexibles : http://www.cea.fr/drf/Pages/Actualites/En-direct-des-labos/2019/des-supercondensateurs-silicium-ultrastables-haute-performance-et-flexibles-.aspx
- Un pseudo-supercondensateur qui allierait la puissance des supercondensateurs avec l'énergie des batteries : http://le-fil-science.cea.fr/actualites-scientifiques/Pages/sciences-de-la-matiere/alliance-supercondensateur-accumulateur.aspx
- Un article du Muséum de Toulouse sur les supercondensateurs : https://www.museum.toulouse.fr/-/les-supercondensateurs-a-la-loupe-ou-comment-l-ecorce-de-noix-de-coco-est-utilisee-pour-stocker-l-energie

Document sous licence libre Creative Commons

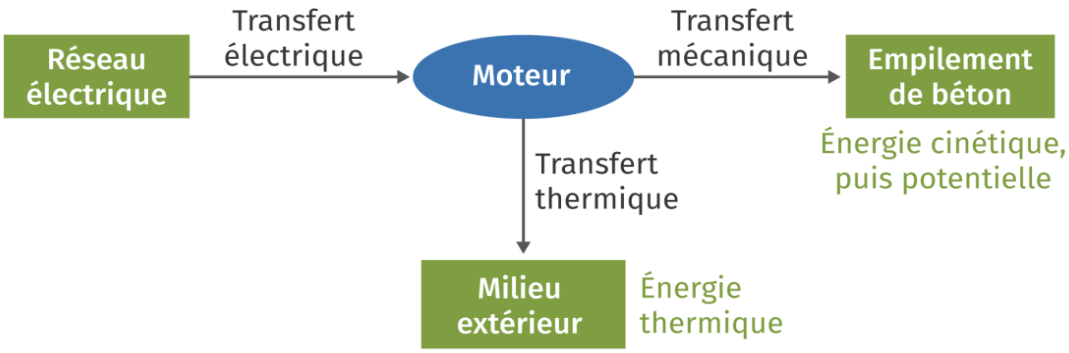
9. Des empilements de béton

Compétence principalement travaillée : Décrire des chaînes de transformation énergétique

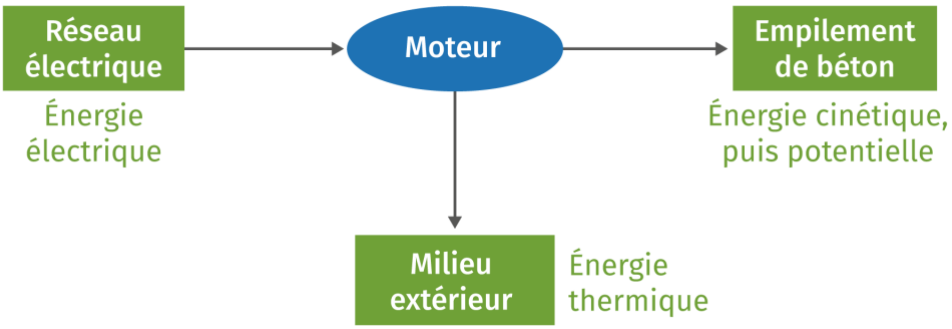
Correction :

1. Le réservoir d'énergie est l'empilement de béton. La forme d'énergie stockée est de l'énergie potentielle de pesanteur.

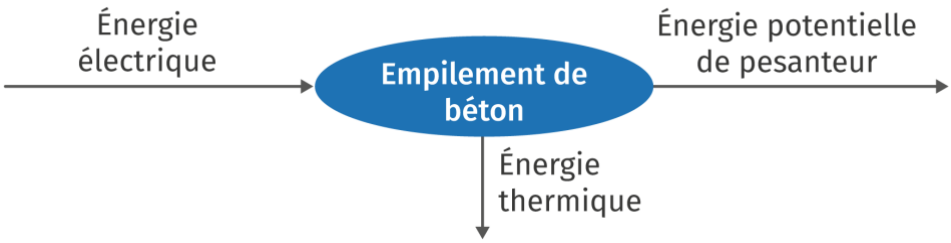
2. La chaîne d'énergie liée au stockage de l'énergie est :
Proposition 1 :



Proposition 2 :

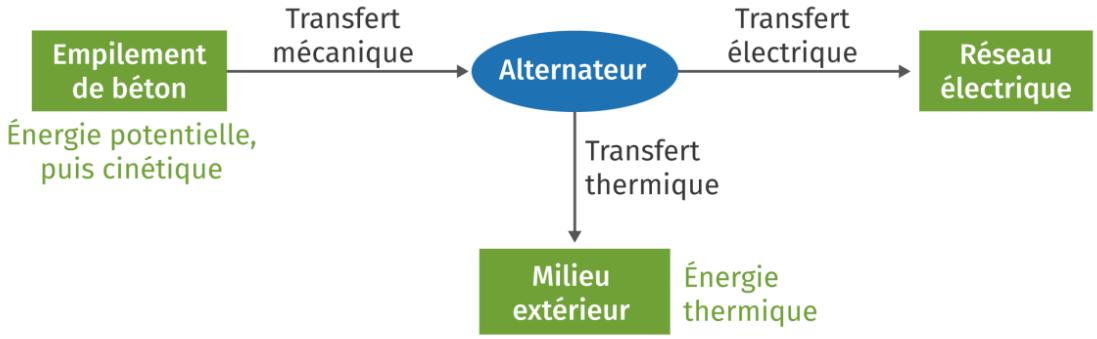


Proposition 3 :

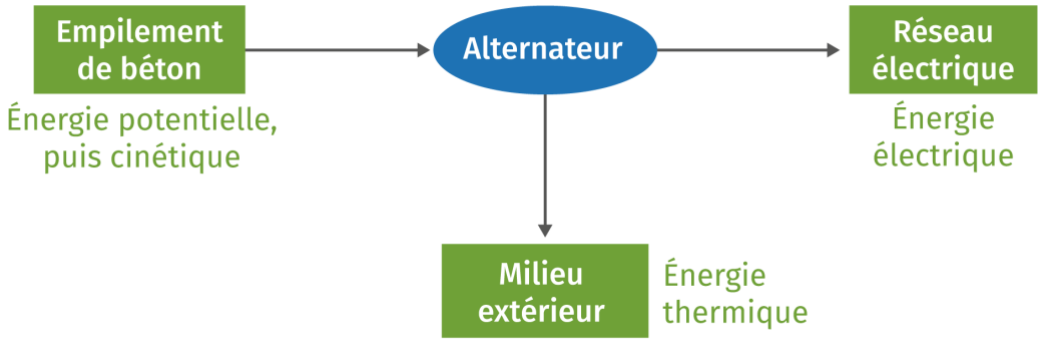


Document sous licence libre Creative Commons

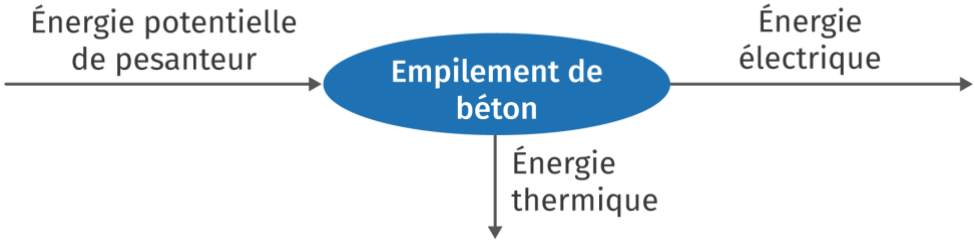
Celle liée au déstockage est :
Proposition 1 :



Proposition 2 :



Proposition 3 :



3. L'énergie stockée dans un bloc de béton placé à 5 m du sol est :
$E_{\text{pp5}} = m \cdot g \cdot h = 35 \times 10^3 \times 9,81 \times 5 = 1,7 \times 10^6 \text{ J} = 1,7 \text{ MJ}$

L'énergie stockée dans un bloc de béton placé à 100 m du sol est :
$E_{\text{pp100}} = m \cdot g \cdot h = 35 \times 10^3 \times 9,81 \times 100 = 34 \times 10^6 \text{ J} = 34 \text{ MJ}$

L'énergie stockée dans une batterie est :
$E_{\text{el}} = 2\ 500 \times 10^{-3} \times 3,6 = 9,0 \text{ W} \cdot \text{h}$ soit $E_{\text{el}} = 9,0 \times 3\ 600 = 32 \times 10^3 \text{ J} = 32 \text{ kJ}$

Un empilement de béton situé à 100 m d'altitude permet de stocker l'équivalent en énergie d'environ 1 000 batteries de cette capacité. Un bloc de béton à 5 m d'altitude permet lui de stocker l'équivalent en énergie de ces 50 batteries.

Document sous licence libre Creative Commons

4. L'énergie acquise lors de la descente du bloc est :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \times 35 \times 10^3 \times 2,9^2 = 1,5 \times 10^5 \text{ J} = 150 \text{ kJ}$$

Un système de production d'électricité plus courant fonctionnant sur le même principe est la STEP (station de transfert d'énergie par pompage).

Sources/Bibliographie :

- Plusieurs ressources sur le projet Energy Vault :
  - https://www.connaissancedesenergies.org/une-tour-de-blocs-de-betons-pour-stocker-lelectricite-190116
  - https://energyvault.com/
  - https://trustmyscience.com/stocker-energie-renouvelable-avec-simples-blocs-beton/
- Le rôle et les chiffres clés des STEP : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step

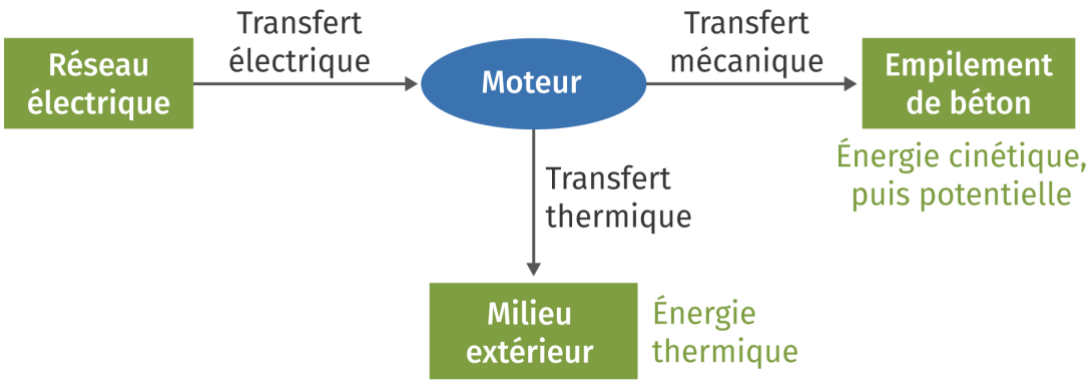
Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Décrire des chaînes de transformation énergétique

1. Sous quelle forme l'énergie est-elle stockée grâce aux empilements de béton ?
Le bloc de béton permet de stocker de l'énergie sous la forme d'énergie potentielle de pesanteur.

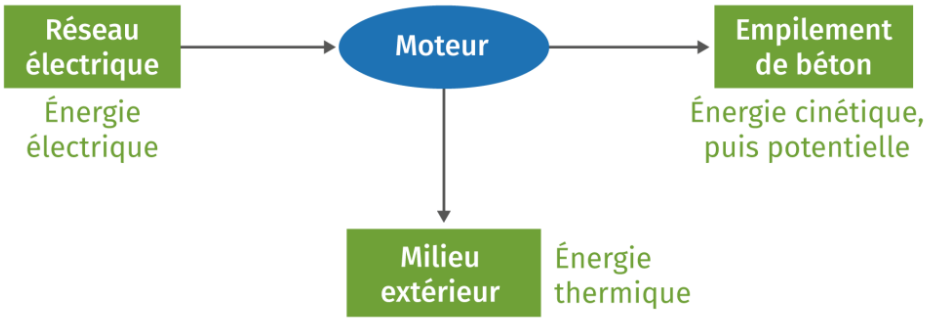
2. Citer un autre dispositif permettant de stocker cette forme d'énergie.
Un barrage hydraulique permet aussi de stocker de l'énergie potentielle de pesanteur.

3. Représenter la chaîne énergétique correspondant au stockage d'énergie.
Proposition 1 :

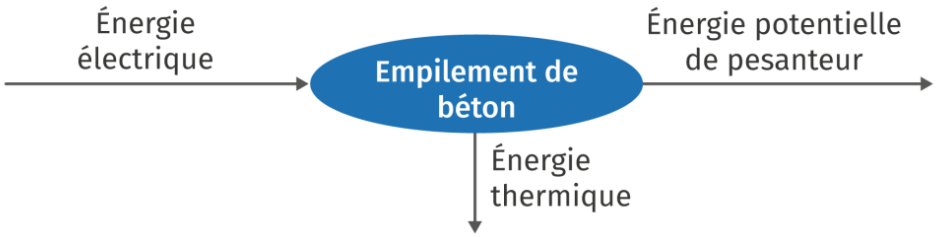


Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 2 :

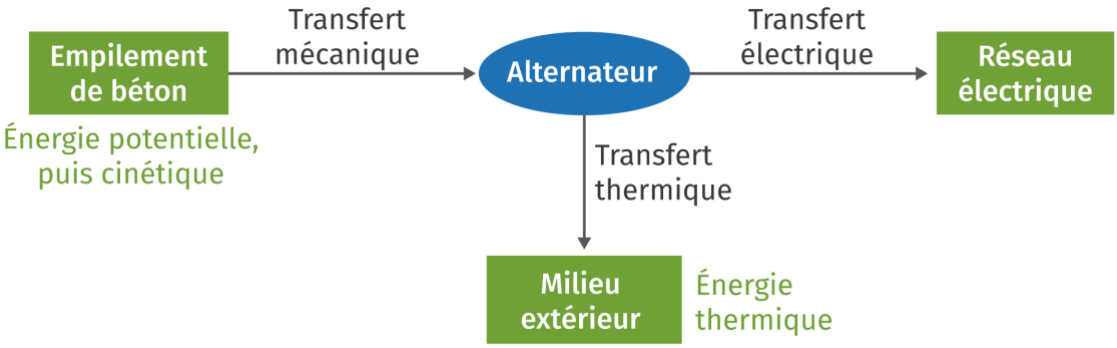


Proposition 3 :

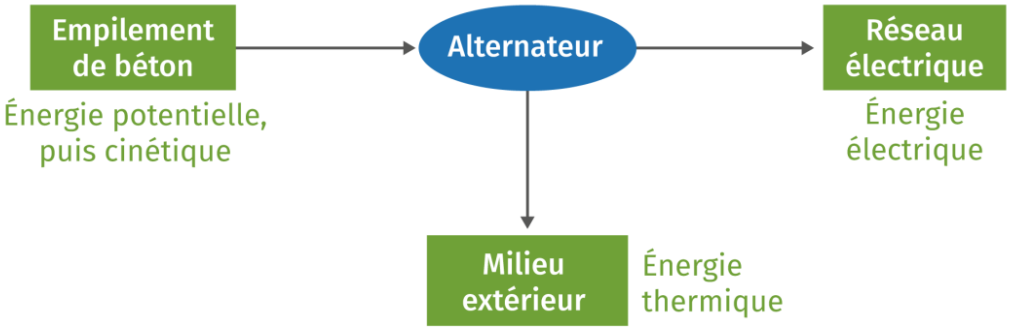


4. Représenter la chaîne énergétique correspondant au déstockage d'énergie.

Proposition 1 :

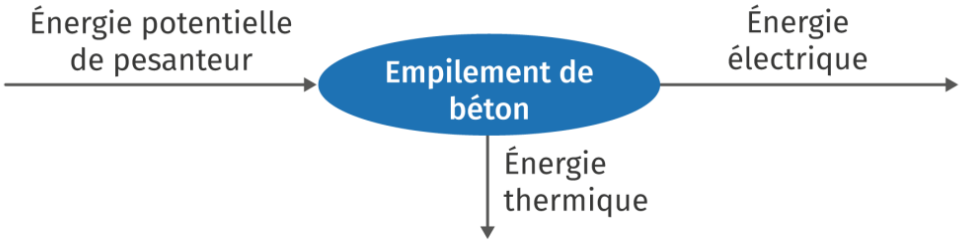


Proposition 2 :



Document sous licence libre Creative Commons

Proposition 3 :



5. Lors de la descente du bloc de béton, l'énergie stockée est convertie en une autre forme d'énergie, laquelle ?
Lors de la descente, l'énergie potentielle de pesanteur se transforme en énergie cinétique.

6. Calculer l'énergie stockée par un bloc de béton à 100 m d'altitude.
L'énergie stockée dans un bloc de béton placé à 100 m du sol est :
$E_{\text{pp100}} = m \cdot g \cdot h = 35 \times 10^3 \times 9,81 \times 100 = 34 \times 10^6 \text{ J} = 34 \text{ MJ}$

7. Calculer l'énergie électrique stockée dans la batterie.
L'énergie stockée dans la batterie est :
$E_{\text{el}} = 2\ 500 \times 10^{-3} \times 3,6 = 9,0 \text{ W} \cdot \text{h}$ soit $E_{\text{el}} = 9,0 \times 3\ 600 = 32 \times 10^3 \text{ J} = 32 \text{ kJ}$

8. Estimer à combien de batteries équivaut le stockage d'énergie à l'aide d'un bloc de béton.
Cela équivaut à environ 1 000 batteries de cette capacité.

9. Lister les avantages et les inconvénients d'un tel dispositif.

Avantages	Inconvénients
• mise en place facile • source d'énergie renouvelable • rendement assez élevé • solution peu coûteuse	• pollution visuelle et sonore • modification de l'écosystème

Document sous licence libre Creative Commons

Le coin des experts (p. 126)

10. Condensateur, un réservoir d'énergie électromagnétique

Compétence principalement travaillée : Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères

Correction :

1. La forme d'énergie stockée dans un condensateur est de l'énergie électromagnétique.

2. Lors de la charge du condensateur, les électrons se déplacent de l'anode vers la cathode. Lors de la décharge, les électrons se déplacent dans l'autre sens, soit de la cathode vers l'anode.

3. L'avantage d'un supercondensateur par rapport à un condensateur classique est de pouvoir stocker une plus grande quantité d'énergie.

4. La principale différence de constitution entre un supercondensateur et un condensateur classique est la présence d'un électrolyte qui permet une meilleure absorption des charges sur les électrodes qui sont en plus poreuses.

5. La différence entre un supercondensateur et un accumulateur est la forme d'énergie qui est stockée. Il s'agit d'énergie électromagnétique pour un supercondensateur, mais d'énergie chimique pour un accumulateur. De plus, dans un accumulateur, les électrodes sont consommées lors de la décharge et reconstituées lors de la charge, alors que les électrodes ne sont pas modifiées dans un supercondensateur.

Sources/Bibliographie :

- Plus d'informations sur la différence entre condensateur et supercondensateur : http://www.supercondensateur.com/non-un-supercondensateur-n-est-pas-un-condensateur

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères

1. Nommer sous quelle forme est stockée l'énergie dans un condensateur.
Un condensateur stocke de l'énergie électromagnétique.

2. Nommer sous quelle forme est stockée l'énergie dans un accumulateur.
Un accumulateur stocke de l'énergie chimique.

3. En déduire la différence fondamentale entre un supercondensateur et un accumulateur.
La différence fondamentale entre les deux dispositifs est la forme d'énergie stockée.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

4. Identifier la différence entre un condensateur classique et un supercondensateur.
Un supercondensateur permet de pouvoir stocker une plus grande quantité d'énergie par rapport à un condensateur classique. Le supercondensateur possède un électrolyte qui permet une meilleure absorption des charges sur les électrodes. De plus, celles-ci sont poreuses.

5. Identifier le sens de déplacement des électrons lors de la charge et de la décharge d'un supercondensateur.
Lors de la charge du condensateur, les électrons se déplacent de l'anode vers la cathode. Lors de la décharge, les électrons se déplacent dans l'autre sens, soit de la cathode vers l'anode.

6. Identifier le sens de déplacement des électrons lors de la charge et de la décharge d'un accumulateur.
Lors de la charge de l'accumulateur, les électrons se déplacent via le circuit électrique de l'électrode en oxyde de plomb vers l'électrode en plomb. Lors de la décharge, les électrons se déplacent dans l'autre sens, soit de l'électrode de plomb vers l'électrode en oxyde de plomb.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 7 : Optimisation du transport de l'électricité

Présentation **2**
Activités **4**
Activité documentaire 1 : Du producteur à l'utilisateur (p. 128) 4
Activité documentaire 2 : L'effet Joule (p. 129) 6
Activité de groupe 3 : Comment transporter l'électricité en minimisant les pertes ? (p. 130-133) 8
Groupe 1 : Modéliser le réseau électrique par un circuit électrique 8
Groupe 2 : Minimiser les pertes par effet Joule 9
Groupe 3 : Modéliser le réseau électrique par le modèle du graphe 9
Groupe 4 : Minimiser les pertes pour la distribution d'énergie 10
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 10
Bilan (p. 135) **15**
Exercices **16**
Zone d'échauffement (p. 136) 16
L'atelier des apprentis (p. 137) 18
Le repaire des initiés (p. 138-139) 21
Le coin des experts (p. 140) 26

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Présentation

Le chapitre 7, étudié dans le thème 2 « Le futur des énergies », est en lien direct avec les chapitres 5 et 6 précédents, qui présentaient le développement des générateurs d'électricité et les atouts de l'électricité comme moyen efficace de transport de l'énergie.
Ce chapitre est l'occasion de comprendre les enjeux de la distribution de l'électricité, ainsi que la minimisation des pertes pour l'économie et l'environnement.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Les lois de l'électricité (loi des nœuds, loi des mailles) : les élèves savent exploiter les lois des mailles et la loi des nœuds dans un circuit électrique comportant au plus deux mailles.
- Les élèves savent mesurer une tension et une intensité.
- Caractéristique tension-courant d'un dipôle : les élèves ont appris à tracer et exploiter la caractéristique d'un dipôle (y compris à l'aide d'un langage de programmation) et savent identifier une situation de proportionnalité.
- Résistance et systèmes à comportement de type ohmique : les élèves savent mesurer une résistance et aussi retrouver la valeur de la résistance en exploitant une série de mesures.
- Loi d'Ohm : les élèves connaissent la loi d'Ohm et savent l'exploiter pour déterminer une tension, une intensité ou une résistance.

Ce qui a été enseigné en première :

- Aucune notion d'électricité n'a été vue en Enseignement scientifique en première.
- Notion de puissance : les élèves connaissent la notion de puissance, vue à plusieurs reprises au cycle 4, ainsi qu'en Enseignement scientifique et en spécialité Physique-Chimie.
- Pour l'enseignement de spécialité : l'énergie, conversions et transferts ; lien entre intensité d'un courant et débit de charge ; modèle de la source réelle de tension continue ; puissance et énergie, bilan de puissance dans un circuit, effet Joule, cas des dipôles ohmiques ; rendement d'un convertisseur.

On sera donc particulièrement vigilant à différencier l'enseignement en fonction du parcours des élèves.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :
Ce chapitre, situé après le chapitre « Deux siècles d'énergie électrique » et « Les atouts de l'électricité », permet de faire le lien entre le développement de l'industrie et la protection de l'environnement.
Optimiser le transport de l'électricité devient un objectif majeur d'une transition climatique et environnementale.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Bibliographie :

CEA, *Incontournable chimie*, n°60 : http://www.cea.fr/Pages/editions/clefs-cea/incontournable-chimie.aspx
Jean-Claude Sabonnadière, *Lignes et réseaux électriques, Tome 1 : Lignes d'énergie électrique*, Hermes science publications, 2007.
Pieter Schavemaker et Lou Van der Sluis, *Le réseau électrique dans son intégralité*, EDP sciences, 2019.

Sitographie :

- Un dossier complet intitulé « Comment est transportée l'électricité » par Engie : https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/comprendre-electricite/etapes-transport-electricite.html
- Un dossier sur les réseaux électriques (Planète énergies) : https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-transport-de-l-electricite
- Un dossier complet sur le réseaux de transport et de distribution d'électricité (EDF) : https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/les-reseaux-de-transport-et-de-distribution-d-electricite
- Un dossier du CEA qui donne l'essentiel sur les énergies : http://www.cea.fr/comprendre/jeunes/Pages/s-informer-reviser/energies/essentiel-sur-energies.aspx

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Une animation (la main à la pâte) à télécharger permettant de comprendre le principe de fonctionnement d'une centrale : https://www.fondation-lamap.org/sites/default/files/upload/media/minisites/projet_transports/eleves/je-suis-ecomobile_animation_9_production-electrique.swf
- Un document proposé par l'académie de Versailles (STI), pour comprendre les énergies électriques : http://maths.vivien.free.fr/documents/Techno/ressource-electricite.pdf
- Un kit pédagogique proposé par EDF (cycle 3, à adapter) : https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/enseignants/kits-pedagogiques/kit-pedagogique-de-l-energie-a-l-electricite
- Un site de l'académie de Caen qui permet de réviser les lois de l'électricité (4e) : https://physique-chimie.discip.ac-caen.fr/spip.php?article61

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activités

L'ensemble des activités permet de comprendre comment est transportée l'électricité, ainsi que les enjeux de l'optimisation de ce transport pour limiter les pertes par effet Joule. L'activité de groupe permet aussi d'utiliser la théorie des graphes pour modéliser le réseau électrique et l'optimisation du transport pour limiter les pertes.

Activité documentaire 1 : Du producteur à l'utilisateur (p. 128)

Le but de cette activité est de comprendre les différentes étapes entre la production de l'électricité et sa distribution.

Lien avec le programme :

Objectifs notionnels :

- Découvrir l'ensemble des interactions qui existent entre les producteurs d'électricité et les consommateurs.
- Comprendre le rôle du réseau de distribution.

Objectifs méthodologiques :

- Savoir analyser un schéma.
- Savoir expliquer les interactions entre les producteurs et les consommateurs.

Durée estimée : 20 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : De la centrale au consommateur
Ce document présente les différents types de producteurs d'électricité, ainsi que les réseaux de distribution. Il donne aussi des informations sur la tension électrique des réseaux de basse, moyenne et haute tension.
La part des énergies renouvelables est aussi indiquée, car elle doit maintenant être prise en compte dans la distribution et l'optimisation de celle-ci.

Document 2 : Schéma d'un *smart grid*
Ce document explique l'intérêt des *smart grids* pour optimiser la distribution et la production.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. La production d'énergie électrique par une éolienne ou par un panneau photovoltaïque est fluctuante car, dans les deux cas, elle repose sur des énergies renouvelables qui ne sont pas fournies de façon homogène dans l'espace et le temps.
En effet, les éoliennes produisent de l'électricité lorsque le vent souffle. La production dépend de la force du vent, et donc, de la situation géographique, de l'heure, de la date, etc.
De même, le panneau photovoltaïque fournit de l'énergie lorsque le panneau est éclairé, ce qui dépend donc du temps qu'il fait (peu de soleil lorsqu'il pleut ou lorsque le ciel est nuageux), ou de l'heure (la nuit, les panneaux ne sont pas éclairés), ou de la latitude (le rendement est bien plus important dans les zones géographiques proches de l'équateur, que dans les zones polaires par exemple).

2. La consommation d'énergie fluctue tout au long de la journée pour différentes raisons.
Dans une usine, la consommation est plus importante pendant les heures de fonctionnement des machines (sauf si celles-ci fonctionnent en continu, la consommation reste quasiment identique sur une journée) que durant la nuit. La consommation est très faible les week-ends. Cependant, il faut noter que certains appareils électriques ne sont pas éteints, même lorsque l'usine est fermée.
Dans un immeuble, la consommation électrique est plus importante le matin (au réveil, les habitants utilisent les appareils électriques) et le soir, ainsi que le week-end, c'est-à-dire lorsque les habitants sont présents dans leur appartement (à l'exception des personnes qui télétravaillent ou qui restent chez elles, par exemple).
Dans un centre commercial, la consommation électrique est importante pendant les heures d'ouverture du centre, mais plutôt faible la nuit (mais non nulle, car certains appareils continuent à fonctionner).

3. L'utilisation d'un *smart grid* est très intéressante pour gérer, d'une part, la production (qui varie en fonction de la part des énergies renouvelables disponibles) et, d'autre part, la consommation (qui varie en fonction de la demande des consommateurs).
Il permet ainsi de gérer les fluctuations de la production et de la consommation en régulant la production.

Ressources complémentaires :

- Un dossier et une animation permettant de comprendre le rôle des *smart grids* : http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=definition-smart-grids

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 2 : L'effet Joule (p. 129)

Cette activité explique le phénomène de l'effet Joule, en précise les avantages et les inconvénients, et explique pourquoi la tension a une influence sur l'énergie dissipée par effet Joule.

Lien avec le programme :

- Au cours du transport, une partie de l'énergie électrique, dissipée dans l'environnement par effet Joule, ne parvient pas à l'utilisateur.
- L'utilisation de la haute tension dans les lignes électriques limite les pertes par effet Joule, à puissance transportée fixée.

Objectifs notionnels :

- Utiliser les formules littérales reliant la puissance à la résistance, l'intensité et la tension pour identifier l'influence de ces grandeurs sur l'effet Joule.
- Utiliser les relations associées à l'effet Joule en courant continu.

Objectifs méthodologiques :

- Savoir manipuler des relations littérales.
- Analyser des relations pour étudier l'influence d'un paramètre sur une grandeur.

Durée estimée : 30 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Avantages et inconvénients de l'effet Joule
Ce document donne la relation mathématique qui définit l'effet Joule, puis en présente les avantages et les inconvénients.

Document 2 : La résistance électrique des câbles
La résistance électrique est définie, en introduisant la notion de résistivité et la résistivité de deux matériaux (cuivre et aluminium) qui sont souvent utilisés pour réaliser des câbles électriques est indiquée.

Document 3 : Influence de la tension sur l'effet Joule
Ce document explique l'influence de la tension électrique sur l'effet Joule. Il montre aussi que le courant qui circule dans le réseau électrique est alternatif.

Document 4 : Un câble pour la haute tension
Il s'agit d'une photo d'un câble pour la haute tension en coupe.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. L'effet Joule a plusieurs inconvénients dans le transport de l'électricité. En effet, il dégage de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui peut endommager le réseau (en entraînant la fusion des gaines par exemple) ou entraîner des incendies (depuis les boîtiers situés sur les pylônes). Ces dégagements peuvent surtout causer des pertes d'énergie tout le long du réseau.

2. La section S peut atteindre $2\ 500\ \mathrm{mm}^2 = 2\ 500 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}^2$.
La résistance de l'âme (en cuivre) d'un câble de longueur 1 000 m se calcule en utilisant la relation donnée dans le document 2, soit :
$R = \dfrac{\rho \cdot L}{S}$
Ainsi, on obtient : $R = \dfrac{1,7 \times 10^{-8} \times 1\ 000}{2\ 500 \times 10^{-6}} = 6,8 \times 10^{-3}\ \Omega$

3. La puissance dissipée par effet Joule se calcule par la relation $P = R \cdot I^2$. À résistance constante, si l'intensité augmente, alors la puissance dissipée par effet Joule augmente. À courant constant (intensité), si la résistance augmente, alors la puissance dissipée par effet Joule augmente.

4. D'après le document 3, l'utilisation de la haute tension permet de diminuer l'intensité à puissance constante.
Réponse plus complète pour les élèves souhaitant une justification : La puissance transmise par l'électricité se calcule selon la formule $P = U \cdot I$. Pour une même puissance *P*, si la tension *U* augmente, alors l'intensité *I* diminue.

5. Le courant est transporté sous haute tension, car si on considère que la puissance transportée est constante, plus la tension est élevée, plus l'intensité est faible, ce qui réduit la puissance dissipée par effet Joule.

Ressources complémentaires :

- Une simulation de calculs de puissance et d'énergie : https://www.pedagogie.ac-nantes.fr/physique-chimie/numerique/animations-simulations/puissance-electrique-683229.kjsp?RH=1161017354093

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité de groupe 3 : Comment transporter l'électricité en minimisant les pertes ? (p. 130-133)

Cette activité de groupe permet aux élèves de modéliser le réseau électrique, soit par un circuit électrique, soit par un graphe orienté, en réinvestissant les notions vues précédemment (graphes en SNT et circuits en seconde).

Lien avec le programme :

- Faire un schéma d'un circuit électrique modélisant une ligne à haute tension.
- Un réseau de transport peut être modélisé mathématiquement par un graphe orienté dont les arcs représentent les lignes électriques et dont les sommets représentent les sources distributrices, les nœuds les intermédiaires et les cibles destinataires.

Objectifs notionnels :

- Savoir représenter une ligne haute tension par un circuit électrique.
- Savoir utiliser le modèle du graphe.
- Savoir représenter un réseau de distribution électrique simple par un graphe orienté.
- Sur l'exemple d'un réseau comportant uniquement deux sources, un nœud intermédiaire et deux cibles, formuler le problème de minimisation des pertes par effet Joule et le résoudre pour différentes valeurs numériques correspondant aux productions des sources et aux besoins des cibles.

Objectifs méthodologiques :

- Savoir représenter un circuit électrique.
- Savoir schématiser un circuit en utilisant le modèle du graphe.

Durée estimée : 50 minutes.

Groupe 1 : Modéliser le réseau électrique par un circuit électrique

Présentation des documents

Document 1 : Symboles normalisés
Ce document donne les symboles normalisés de plusieurs composants utilisés dans un circuit électrique.

Document 2 : **Transport de l'électricité**
Ce document est un schéma simplifié du réseau électrique entre une usine de production et un utilisateur.

Document 3 : Le transformateur
Ce document présente le transformateur et définit le rapport de transformation *m*.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Groupe 2 : Minimiser les pertes par effet Joule

Présentation des documents

Document 4 : Une modélisation du réseau de distribution
Ce document modélise la partie du réseau de distribution par un schéma électrique.

Document 5 : **Contraintes des distributeurs d'énergie**
Ce document présente les contraintes des distributeurs d'énergie, car seule l'énergie effectivement consommée peut être facturée. Le compteur « Linky » permet de suivre l'évolution de la consommation d'un ménage français en temps réel, pour adapter la production d'électricité.

Document 6 : Loi d'Ohm
Ce document rappelle la loi d'Ohm, loi reliant la valeur de la tension aux bornes d'un dipôle ohmique en fonction de l'intensité qui le traverse.

Document 7 : Rendement
La notion de rendement est définie avec la formule pour le calculer.

Document 8 : Puissance électrique
Ce document rappelle la définition de la puissance électrique pour un générateur et pour un récepteur.

Groupe 3 : Modéliser le réseau électrique par le modèle du graphe

Présentation des documents

Document 9 : Définition d'un graphe
Ce document rappelle la définition d'un graphe, notion vue en SNT (seconde).

Document 10 : **Applications**
Quelques applications pratiques des graphes sont présentées dans la vie courante.

Document 11 : Éléments de vocabulaire de la théorie des graphes
Ce schéma présente un exemple de graphe avec toutes les définitions importantes.

Document 12 : Application au réseau électrique
Ce document explique comment modéliser un réseau électrique à l'aide de la théorie des graphes.

Document 13 : Un réseau insulaire
Ce document présente un exemple concret de l'application de la théorie des graphes appliqué à un réseau insulaire.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Groupe 4 : Minimiser les pertes pour la distribution d'énergie

Présentation des documents

Document 14 : Situation étudiée
Ce document présente la situation étudiée dans cette activité. Il s'agit de la distribution de l'électricité dans deux villes de moyenne montagne, dont l'électricité provient de deux sources.

Document 15 : **Caractéristiques du réseau**
Un schéma modélise le réseau de distribution de l'électricité des deux villes, et le texte présente des données pertinentes pour résoudre le problème.

Document 16 : Modélisation du réseau et réalité physique
Ce document donne les contraintes à respecter pour résoudre le problème.

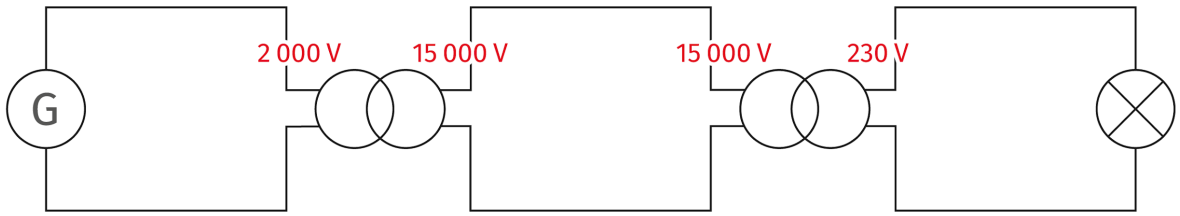
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Les composants électriques à choisir pour réaliser le circuit sont un générateur, des fils, deux transformateurs et un récepteur (une lampe ou un dipôle ohmique par exemple).

2. La ligne à haute tension peut être représentée par un ensemble de composants disposés en trois circuits.
Un premier circuit, constitué d'un générateur (l'usine) à la sortie duquel la tension est de 2 000 V, puis un transformateur (élévateur de tension) aux bornes duquel la tension est de 15 000 V.
Dans le deuxième circuit, on trouve les fils électriques et deux transformateurs : un premier aux bornes duquel la tension est de 15 000 V et l'autre aux bornes duquel la tension est elle aussi de 15 000 V.
Le troisième circuit est constitué d'un transformateur (abaisseur de tension), aux bornes duquel la tension est de 230 V, et de différents composants récepteurs (une lampe, un dipôle ohmique, en ajoutant éventuellement un interrupteur, etc.).

3. La ligne à haute tension est schématisée (on peut ajouter des résistances et un interrupteur dans la boucle de la lampe) :



Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

	Tension dans le circuit primaire	Tension dans le circuit secondaire
1er transformateur	2 000 V	15 000 V
2nd transformateur	15 000 V	230 V

Groupe 2 :

Pour ce groupe, la valeur de $R = 10^{-2}\ \Omega$ correspond à un câble d'une longueur d'environ 1 500 m (voir activité précédente).

1. La loi des mailles appliquée au circuit permet d'établir la relation entre les différentes tensions, soit $U = U_R + U_T$. Ce qui permet d'écrire : $U = R \cdot I + U_T$. Et donc :
$$I = \frac{U - U_T}{R}$$
L'intensité I dépend donc de la tension aux bornes du générateur (fixe) et de la tension « de sortie » (qui elle dépend de la puissance souhaitée).

2. La puissance dissipée par effet Joule dans la résistance *R* (qui modélise la résistance des fils électriques du réseau) s'exprime par la relation $P = R \cdot I^2$.
On peut ainsi exprimer la puissance dissipée dans la résistance en remplaçant I dans l'expression :
$$P = \frac{R(U - U_T)^2}{R^2} = \frac{(U - U_T)^2}{R}$$

3. La puissance du générateur est intégralement transmise : $P_G = P_R + P_T$.
Or, on a :
- $P_G = U_G \cdot I$
- $P_T = U_T \cdot I$
- $P_R = R \cdot I^2$

Alors : $I = \dfrac{P_G}{U_G}$

On en déduit : $P_G = R \cdot \left(\dfrac{P_G}{U_G}\right)^2 + U_T \cdot \dfrac{P_G}{U_G}$

Donc : $U_T = U_G - \dfrac{R \cdot P_G}{U_G}$

Si U_G = 230 V : $U_T = 230 - \dfrac{10 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^3}{230} = 228\ \text{V}$

Si U_G = 50 kV : $U_T = 50 \times 10^3 - \dfrac{10 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^3}{50 \times 10^3} = 50\ \text{kV}$

Le rendement du transformateur s'exprime par la relation suivante :
$$r = \frac{P_T}{P_G} = \frac{U_T}{U_G} = \frac{U_G^2 - R \cdot P_G}{U_G^2} = 1 - \frac{R \cdot P_G}{U_G^2}$$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Si U_G = 230 V : $r = 1 - \frac{10 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^3}{230^2} = 0,99$

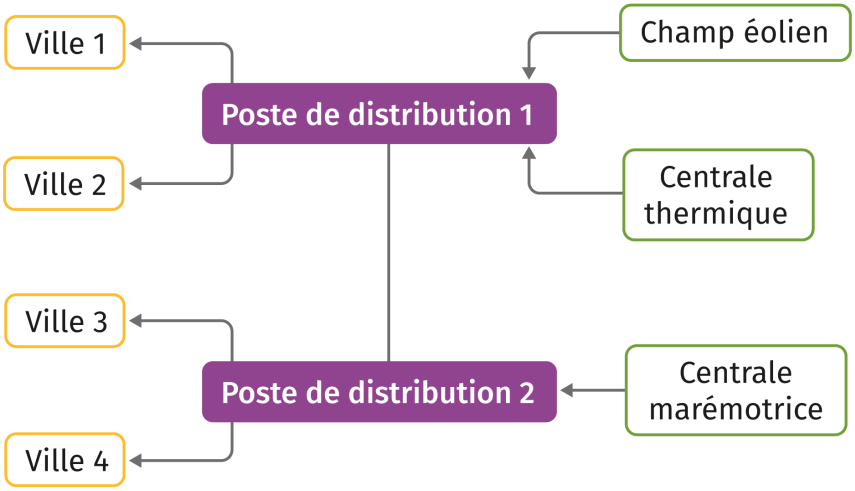
Si U_G = 50 kV : $r = 1 - \frac{10 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^3}{(50 \times 10^3)^2} = 1,0$

La haute tension permet donc d'augmenter le rendement de 1 % dans le cas étudié.

Il est aussi possible de réaliser l'ensemble de la résolution à l'aide d'un tableur (fichier téléchargeable avec le livre du professeur). On peut alors effectuer rapidement les calculs pour différentes longueur de câbles et ainsi d'accentuer l'écart entre les différents rendements.

Groupe 3 :

Le graphe est représenté ci-dessous, en respectant les contraintes données dans l'énoncé :

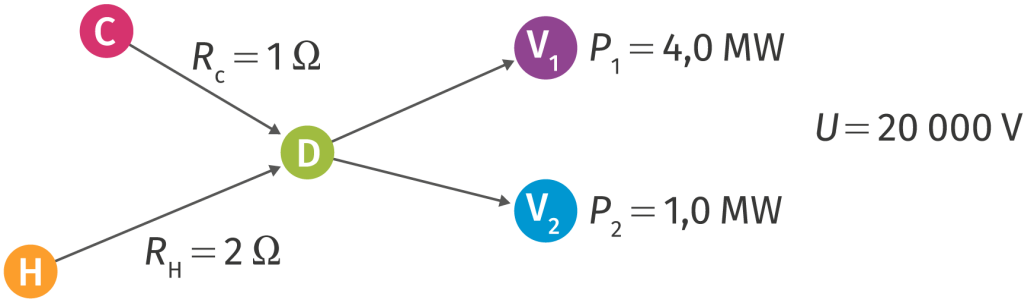


Les quatre villes, les deux postes de distribution, le champ éolien, la centrale thermique et la centrale marémotrice sont les sommets du graphe.
La ville 1 et la ville 2 sont reliées au poste de distribution 1 par un arc orienté vers la ville (le poste distribue l'électricité).
La ville 3 et la ville 4 sont reliées au poste de distribution 2 par un arc orienté vers la ville (le poste distribue l'électricité).
Le champ éolien et la centrale thermique sont reliés au poste de distribution 1 par un arc orienté vers le poste (les centrales distribuent l'électricité vers le poste).
La centrale marémotrice est reliée au poste de distribution 2 par un arc orienté vers le poste (la centrale distribue l'électricité vers le poste).
Les postes de distribution sont reliés par un arc non orienté, afin d'assurer le transport de l'électricité vers les 4 villes à partir des 3 centrales de production de l'électricité.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Groupe 4 :

1. Le graphe représentant la situation étudiée est constituée de cinq sommets, reliés par des arcs orientés : la centrale à charbon (C), la centrale hydraulique (H), la ville 1 (V_1), la ville 2 (V_2) le poste de distribution (D).
La centrale à charbon est reliée au poste de distribution par un arc orienté vers le poste (D).
La centrale hydraulique est reliée au poste de distribution par un arc orienté vers le poste (D).
Le poste de distribution est relié aux deux villes par deux axes orientés.



On peut calculer l'intensité dans les différentes branches desservant les villes en utilisant la définition de la puissance ($P = U \cdot I$) connaissant la puissance nécessaire dans chaque ville.

L'intensité du courant électrique arrivant dans la ville 1 est : $I_{\text{ville 1}} = \dfrac{P_1}{U}$

Donc : $I_{\text{ville 1}} = \dfrac{4,0 \times 10^6}{20 \times 10^3} = 200\ \text{A}$

L'intensité du courant électrique arrivant dans la ville 2 est : $I_{\text{ville 2}} = \dfrac{P_2}{U}$

Donc : $I_{\text{ville 2}} = \dfrac{1,0 \times 10^6}{20 \times 10^3} = 50\ \text{A}$

2. Pour calculer les résistances entre les centrales et le poste de distribution, il faut déterminer les intensités I_1 et I_2.
Comme la résistance du câble provenant de la centrale hydroélectrique a une résistance deux fois plus élevée que celle provenant de la centrale à charbon alors on peut écrire :
- R_1 = 1 Ω (donnée du texte) ;
- R_2 = 2 Ω.

L'intensité du courant sortant du poste de distribution est égale à l'intensité du courant entrant dans le poste de distribution donc : $I_1 + I_2 = I_{\text{ville 1}} + I_{\text{ville 2}} = 250\ A$.

3. Lorsqu'un courant traverse un circuit, une partie de l'énergie (proportionnelle à la puissance) est dissipée par effet Joule. La puissance dissipée par effet Joule s'exprime par la relation $P = R \cdot I^2$.
Il y a donc des pertes à tous les niveaux de la distribution : pertes entre les centrales et le poste de distribution, ainsi que des pertes entre le poste de distribution et les villes.
Pertes entre la centrale à charbon et le poste de distribution :
$P_1 = R_1 \cdot I_1^2$

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Pertes entre la centrale hydroélectrique et le poste de distribution :
$P_2 = R_2 \cdot I_2^2$ soit une puissance totale dissipée $P_t = P_1 + P_2 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$
On ne connaît pas la résistance des câbles entre le poste de distribution et les villes, ce qui ne permet pas de calculer les pertes par effet Joule sur cette portion. Cependant, les valeurs des intensités de ces branches sont imposées par la demande des deux villes, on ne peut donc pas influer sur ces valeurs.

4. La grandeur à minimiser est la puissance dissipée par effet Joule pour diminuer les pertes. Pour cela, on peut influer seulement sur l'intensité dans les branches 1 et 2 dans cette situation (à moins de modifier les installations de distribution). On va donc chercher les valeurs de I_1 et de I_2 permettant de minimiser ces pertes.
Les valeurs de I_1 et I_2 sont liées par la relation : $I_1 + I_2 = 250$ A soit $I_2 = 250 - I_1$.
$P_t = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot (250 - I_1)^2$

Cette résolution n'est pas attendue numériquement par les élèves, on peut tracer la fonction $P_t = f(I_1)$ et chercher son minimum. On peut le faire à l'aide du script python ci-dessous à compléter (ici, $I_{max} = 250$, $R_1 = 1$ et $R_2 = 2$).

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

imax=
R1=
R2=
def puiss(x):
      return x**2*R1+(imax-x)**2*R2

x = np.linspace(0, imax, 50)
y = puiss(x)
plt.plot(x, y)
plt.xlabel("Intensité dans la branche 1 (A)")
plt.ylabel("Puissance dissipée en amont du poste (W)")
plt.show()
```

On trouve que la puissance dissipée est minimale pour une intensité d'environ 165 A dans la branche 1.

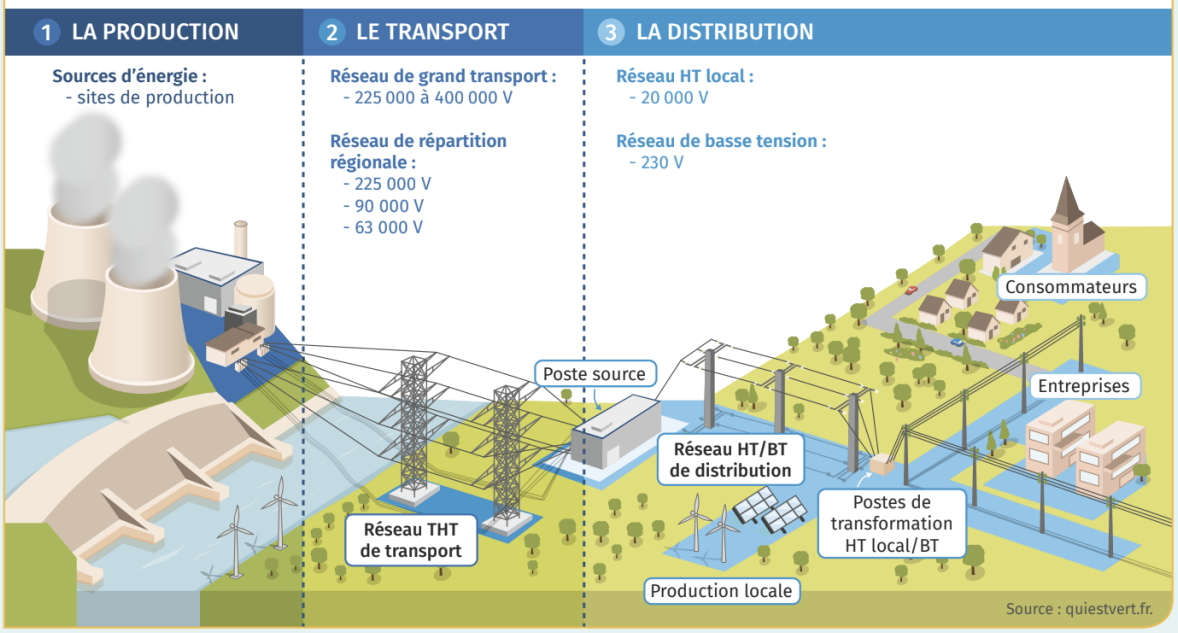
Ressources complémentaires :

- https://eduscol.education.fr/cid143130/enseignement-scientifique-bac-2021.html#lien3

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 135)

Le réseau électrique en France



Énergie dissipée par effet Joule

$$P_{elec} = U \cdot I$$

Tension efficace (volt) — Puissance électrique transférée (watt) — Intensité efficace (ampère)

⚠ Pour tout dipôle

$$U = R \cdot I$$

Tension efficace (volt) — Résistance (ohm) — Intensité efficace (ampère)

⚠ Seulement pour un conducteur ohmique (c.a.d. purement résistif)

$$E_{joule} = R \cdot I_{eff}^2 \cdot \Delta t$$

$$P_{joule} = R \cdot I_{eff}^2$$

Énergie dissipée par effet Joule (joule) — Chaleur — Résistance (ohm) — Intensité efficace (ampère) — Durée (seconde) — Puissance dissipée par effet Joule (watt = joule/s)

⚠ À résistance constante et pour un courant périodique ou continu

Représentations du réseau de transport électrique

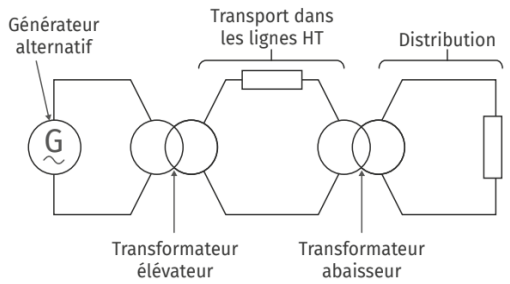
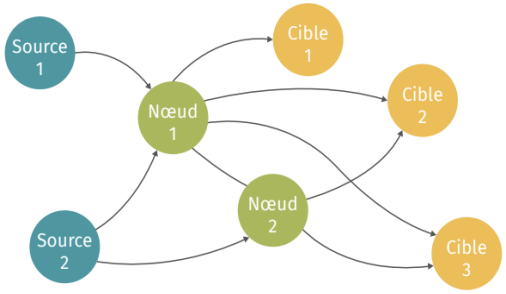


Schéma du réseau de distribution électrique.



Graphe d'un réseau de distribution.

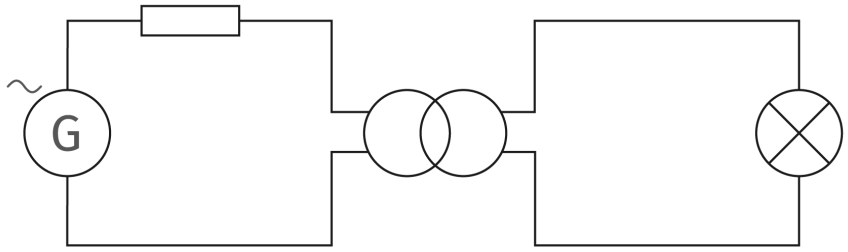
Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 136)

1. Circuit électrique.

Le schéma est réalisé ci-dessous :



2. Intensité efficace

L'intensité efficace traversant le câble est définie par la relation : $I = \frac{P}{U}$

Soit : $I = \frac{100 \times 10^6}{50 \times 10^3} = 2,0 \times 10^3 \text{ A}$

3. Effet Joule (1)

a. La tension aux bornes de ce câble est : $U = \frac{P}{I}$

Donc : $U = \frac{10 \times 10^3}{20} = 5,0 \times 10^2 \text{ V}$

b. La résistance de ce câble est calculée avec la relation $U = R \cdot I$, soit $R = \frac{U}{I}$

On a donc $R = \frac{500}{20} = 25\ \Omega$

On peut aussi la calculer en remplaçant *U*, qui a été calculé dans la question précédente, par son expression, soit : $R = \frac{P}{I^2}$, soit : $R = \frac{10 \times 10^3}{20^2} = 25\ \Omega$

4. Résistance (1)

La résistance du fil est : $R = \frac{\rho \cdot L}{S}$

Donc : $R = \frac{1,7 \times 10^{-8} \times 0,50}{1,0 \times 10^{-7}} = 85 \times 10^{-3}\ \Omega$

5. Résistance (2)

a. La longueur de ce fil est : $L = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4\rho}$

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Donc : $L = \dfrac{100 \times \pi \times \left(1,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4 \times 2,8 \times 10^{-8}} = 2,8 \times 10^3 \text{ m} = 2,8 \text{ km}$

b. La longueur de ce fil est : $L = \dfrac{R \cdot S}{\rho} = \dfrac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4\rho}$

Donc : $L = \dfrac{100 \times \pi \times \left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4 \times 2,8 \times 10^{-8}} = 11 \times 10^3 \text{ m} = 11 \text{ km}$

6. Effet Joule (2)

L'énergie dissipée par effet Joule par ce fil électrique est :

$$E_J = P_J \cdot \Delta t = R \cdot I^2 \cdot \Delta t = \frac{\rho \cdot L}{S} \cdot I^2 \cdot \Delta t$$

Donc : $E_J = \dfrac{1,3 \times 10^{-6} \times 1,5 \times 10^3}{\pi \times \left(6,0 \times 10^{-3}\right)^2} \times \left(200 \times 10^{-3}\right)^2 \times 24 = 17 \text{ W} \cdot \text{h}$

7. Théorie des graphes

a. A, B, C et D sont des sommets du graphe.

b. A et B sont reliés par un arc non orienté, ils sont adjacents. A est relié à B et B est relié à A.

c. Le sommet A présente une boucle car il est relié à lui-même.

8. Haute tension. La haute tension permet :

b. de diminuer les pertes par effet Joule.

9. À quoi sert un *smart grid* ?

a. Réguler la production d'électricité en fonction des besoins des consommateurs.

10. Quel dispositif permet de modifier la tension du courant électrique ?

a. Un transformateur.

Exercice A. En France, la tension délivrée aux consommateurs a une tension efficace de 230 V et une fréquence de 50 Hz alors qu'au Canada, la tension efficace est de 120 V et la fréquence de 60 Hz. Calculer, en France et au Canada, les valeurs maximales de la tension ainsi que leurs périodes.

Pour un signal sinusoïdale, les valeurs efficace U et maximale U_{max} de la tension sont liées par la formule : $U_{max} = \sqrt{2} \cdot U$.

La période T et la fréquence f d'un signal sont liés par la formule : $T = \dfrac{1}{f}$.

En France : U_{max} = 325 V et T = 0,020 Hz = 20 mHz.

Au Canada : U_{max} = 170 V et T = 0,017 Hz = 17 mHz.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 137)

11. Transformateur

Compétence principalement travaillée : Utiliser le calcul littéral et la proportionnalité

Correction :

1. Le rapport m du transformateur est : $m = \frac{N_2}{N_1}$
Donc : $m = \frac{115}{500} = 0,23$

2. La tension aux bornes du circuit secondaire est : $U_2 = m \cdot U_1$
Donc : $U_2 = 0,23 \times 1\,000 = 230\ \text{V}$

3. L'intensité efficace dans le circuit primaire est : $I_1 = \frac{P}{U_1}$
Donc : $I_1 = \frac{11,5 \times 10^3}{1\,000} = 11,5\ \text{A}$

4. L'intensité efficace dans le circuit secondaire est : $I_2 = \frac{I_1}{m}$
Donc : $I_2 = \frac{11,5}{0,23} = 50\ \text{A}$

Suggestion de questions supplémentaires :

5. **Vérifier que la puissance dans le circuit secondaire est la même que dans le circuit primaire.**
La puissance est définie par $P = U_2 \cdot I_2$, soit $P = 230 \times 50 = 11,5\ \text{kW}$. On obtient bien la même puissance que celle du circuit primaire.

Correction de l'exercice décliné dans en version initié :

Compétence principalement travaillée : Utiliser le calcul littéral et la proportionnalité

On applique une tension de 1000 V aux bornes du circuit primaire, qui reçoit une puissance de 11,5 kW. Calculer l'intensité I_2 dans le circuit secondaire.
Pour calculer l'intensité dans le circuit secondaire, il faut déterminer les grandeurs dans le circuit primaire et dans le circuit secondaire en utilisant les données du texte.
Le nombre de spires dans le circuit primaire et le circuit secondaire permet de déterminer le rapport *m* du transformateur, puis d'en déduire la tension aux bornes du circuit secondaire.
Le rapport *m* du transformateur est : $m = \frac{N_2}{N_1}$
Donc : $m = \frac{115}{500} = 0,23$
La tension aux bornes du circuit secondaire est : $U_2 = m \cdot U_1$
Donc : $U_2 = 0,23 \times 1\,000 = 230\ \text{V}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

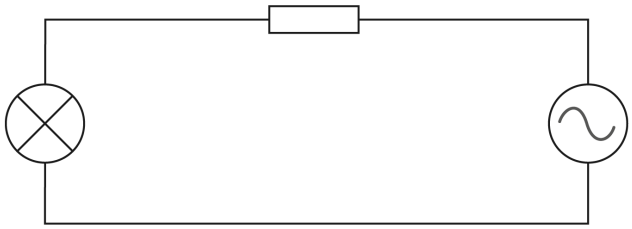
La puissance dans le circuit permet de connaître l'intensité dans le circuit primaire qui est :
$I_1 = \frac{P}{U_1}$ donc $I_1 = \frac{11,5 \times 10^3}{1\,000} = 11,5 \text{ A}$
Ensuite, on peut calculer l'intensité efficace dans le circuit secondaire :
$I_2 = \frac{I_1}{m}$ donc $I_2 = \frac{11,5}{0,23} = 50 \text{ A}$

12. Transport dans des câbles

Compétence principalement travaillée : Utiliser le calcul littéral et la proportionnalité

Correction :

1. Le circuit est schématisé ci-dessous :



2. La résistance du câble en cuivre est : $R = r \cdot L$, soit :
$R = 8,5 \times 10^{-6} \times 500 = 4,3 \times 10^{-3}\ \Omega$
L'intensité du courant traversant le câble est : $I = \frac{P}{U}$
Donc : $I = \frac{20 \times 10^6}{400 \times 10^3} = 50 \text{ A}$

3. L'énergie perdue par effet Joule en une journée est : $E_J = P_J \cdot \Delta t$
Alors : $E_J = R \cdot I^2 \cdot \Delta t$
$E_J = 4,3 \times 10^{-3} \times 50^2 \times 24 = 254 \text{ W} \cdot \text{h}$

Suggestion de questions supplémentaires :

4. **Comment pourrait-on diminuer les pertes par effet Joule ?**
En diminuant la valeur de la résistance (autre matériau moins résistant).

5. **Estimer le pourcentage de perte par effet Joule.**
Pour une puissance fournie de 20 MW, on perd : $\frac{254}{24} = 10,6 \text{ W} \cdot \text{h}$
Soit un pourcentage de $5,3 \times 10^{-5}$ %

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

13. Application de la théorie des graphes

Compétence principalement travaillée : Savoir utiliser le modèle des graphes

Note : Pour cet exercice, on présente une notation alternative pour les arc non orientés afin que les élèves aient rencontré les deux notations. Lorsque les arcs ne sont pas pondérés, ces notations sont équivalentes, la notation avec deux flèches peut servir à différencier le cas où la pondération est différente d'une direction à l'autre.

Correction :

1. Faux. Il n'y a pas de chemin entre F et G par exemple.

2. Vrai. Depuis le sommet A, on peut atteindre n'importe quel autre sommet.

3. Faux. Il n'y a toujours pas de chemin entre F et G.
Faux. On ne peut pas atteindre le sommet D à partir de A dans ce cas (l'arc reliant B à D est orienté).

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

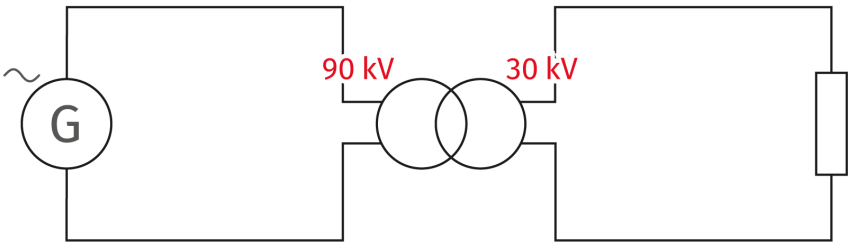
Le repaire des initiés (p. 138-139)

14. Circuit modélisé

Compétence principalement travaillée : Savoir représenter un circuit électrique

Correction :

1. Le schéma simplifié du circuit est donné ci-dessous :



2. Ce transformateur est un abaisseur de tension, car la tension aux bornes du circuit primaire est supérieure à la tension aux bornes du circuit secondaire. La tension est donc abaissée.

3. Le rapport du transformateur est : $m = \frac{U_2}{U_1}$

Donc : $m = \frac{30 \times 10^3}{90 \times 10^3} = \frac{1}{3} = 0,33$

4. La puissance se conserve entre le circuit primaire et le circuit secondaire. L'intensité dans le circuit primaire est : $I_1 = \frac{P}{U_1}$

Donc : $I_1 = \frac{90 \times 10^6}{90 \times 10^3} = 1,0 \times 10^3 \text{ A} = 1,0 \text{ kA}$

L'intensité dans le circuit secondaire est : $I_2 = \frac{P}{U_2}$

Donc : $I_2 = \frac{90 \times 10^6}{30 \times 10^3} = 3,0 \times 10^3 \text{ A} = 3,0 \text{ kA}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

15. Comparer des matériaux

Compétence principalement travaillée : Savoir calculer une résistance électrique

Correction :

1. La résistance des 3 fils est :

Cuivre	$R_{\text{cuivre}} = \dfrac{\rho_{\text{cuivre}} \cdot L}{S} = \dfrac{4\rho_{\text{cuivre}} \cdot L}{\pi \cdot d^2}$ $R_{\text{cuivre}} = \dfrac{4 \times 1,7 \times 10^{-8} \times 100}{\pi \times \left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2} = 0,54\ \Omega$
Aluminium	$R_{\text{aluminium}} = \dfrac{\rho_{\text{aluminium}} \cdot L}{S} = \dfrac{4\rho_{\text{aluminium}} \cdot L}{\pi \cdot d^2}$ $R_{\text{aluminium}} = \dfrac{4 \times 2,8 \times 10^{-8} \times 100}{\pi \times \left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2} = 0,86\ \Omega$
Argent	$R_{\text{argent}} = \dfrac{\rho_{\text{argent}} \cdot L}{S} = \dfrac{4\rho_{\text{argent}} \cdot L}{\pi \cdot d^2}$ $R_{\text{argent}} = \dfrac{4 \times 1,6 \times 10^{-8} \times 100}{\pi \times \left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2} = 0,51\ \Omega$

2. La masse de ces 3 fils est :

Cuivre	$m_{\text{cuivre}} = \rho_{\text{cuivre}} \cdot V = \rho_{\text{cuivre}} \cdot \pi \cdot L \cdot \dfrac{d^2}{4}$ $m_{\text{cuivre}} = 8\,960 \times \pi \times 100 \times \dfrac{\left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4} = 2,8\ \text{kg}$
Aluminium	$m_{\text{aluminium}} = \rho_{\text{aluminium}} \cdot V = \rho_{\text{aluminium}} \cdot \pi \cdot L \cdot \dfrac{d^2}{4}$ $m_{\text{aluminium}} = 2\,700 \times \pi \times 100 \times \dfrac{\left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4} = 0,85\ \text{kg}$
Argent	$m_{\text{argent}} = \rho_{\text{argent}} \cdot V = \rho_{\text{argent}} \cdot \pi \cdot L \cdot \dfrac{d^2}{4}$ $m_{\text{argent}} = 10\,500 \times \pi \times 100 \times \dfrac{\left(2,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4} = 3,3\ \text{kg}$

3. On utilise des fils en cuivre, car le cuivre possède une très bonne conductivité électrique pour un coût raisonnable.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

4. Il peut être utile d'opter pour des fils en aluminium, surtout pour de très longs câbles, afin de limiter la masse grâce à la faible masse volumique de l'aluminium. On peut également utiliser des fils en argent lorsqu'on a besoin de très petits fils avec une excellente conductivité.

16. Longueur d'un fil

Compétence principalement travaillée : Savoir calculer une résistance électrique.

Correction :

1. La longueur du fil de platine est : $L_{\text{platine}} = \dfrac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4\rho_{\text{platine}}}$

Donc : $L_{\text{platine}} = \dfrac{1,0 \times \pi \times \left(1,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4 \times 10 \times 10^{-8}} = 7,9 \text{ m}$

2. La longueur du fil s'il était en cuivre serait : $L_{\text{cuivre}} = \dfrac{R \cdot \pi \cdot d^2}{4\rho_{\text{cuivre}}}$

Donc : $L_{\text{cuivre}} = \dfrac{1,0 \times \pi \times \left(1,0 \times 10^{-3}\right)^2}{4 \times 1,7 \times 10^{-8}} = 46 \text{ m}$

3. Le diamètre du fil s'il était en laiton serait : $d = \sqrt{\dfrac{4\rho_{\text{laiton}} \cdot L}{R \cdot \pi}}$

Donc : $d = \sqrt{\dfrac{4 \times 7,1 \times 10^{-8} \times 10,0}{1,0 \times \pi}} = 9,5 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,95 \text{ mm}$

17. Variation de l'intensité

Compétence principalement travaillée : Utiliser le calcul littéral et effectuer des calculs numériques

Correction :

1. L'intensité circulant dans le circuit en basse tension est : $I = \dfrac{P}{U}$

Donc : $I = \dfrac{100 \times 10^3}{1\,000} = 100 \text{ A}$

2. L'intensité circulant dorénavant dans le circuit est : $I = \dfrac{P}{U}$

Donc : $I = \dfrac{50 \times 10^3}{1\,000} = 50 \text{ A}$

3. La tension aux bornes du circuit primaire est : $U_1 = \dfrac{U_2}{m}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Donc : $U_1 = \frac{1\,000}{75} = 13\text{ V}$ ou $U_1 = \frac{1\,000}{\frac{1}{75}} = 1\,000 \times 75 = 75 \times 10^3\text{ V} = 75\text{ kV}$

L'intensité du courant au primaire est donc : $I = \frac{P}{U}$

Donc : $I = \frac{100 \times 10^3}{13} = 7\,500\text{ A}$ ou $I = \frac{100 \times 10^3}{75 \times 10^3} = 1,3\text{ A}$

18. Un pic de consommation

Compétence principalement travaillée : Extraire l'information de supports variés

Correction :

1. La vague de froid de février 2012 a entraîné une surconsommation d'électricité, car de nombreux ménages se chauffant à l'aide de radiateurs électriques, ou de chauffage au sol électrique, et il a fallu chauffer plus (longtemps) à cause du froid.

2. La puissance moyenne utilisée par un Français par jour est : $P = \frac{E}{\Delta t}$

Donc : $P = \frac{7\,756 \times 10^3}{365,25 \times 24} = 885\text{ W}$

3. La puissance moyenne mobilisée par l'ensemble des français (environ 67 millions d'habitants) est : $P_{\text{moyenne}} = N_{\text{francais}} \cdot P$

Donc : $P_{\text{moyenne}} = 67 \times 10^6 \times 885 = 5,9 \times 10^1\text{ W} = 59\text{ GW}$

Ce nombre est inférieur à la puissance relevée par RTE, car la valeur donnée est une puissance instantanée, alors que nous venons de calculer une valeur moyenne.

4. RTE devrait donner une valeur d'énergie (en W·h) au lieu d'une valeur de puissance (en W).

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Extraire l'information de supports variés

1. **Expliquer pourquoi la vague de froid de février 2012 a entraîné des pics de consommation électrique.**

La vague de froid a entraîné une surconsommation d'électricité, car de nombreux ménages se chauffant à l'aide de radiateurs électriques, ou de chauffage au sol électrique, et il a fallu chauffer plus (longtemps) à cause du froid.

2. **Un Français utilise en moyenne 7 756 kW·h par an d'énergie électrique. Estimer la puissance moyenne utilisée par Français.**

La puissance moyenne utilisée par un Français par jour est : $P = \frac{E}{\Delta t}$

Donc : $P = \frac{7\,756 \times 10^3}{365,25 \times 24} = 885\text{ W}$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

19. Un problème de graphe

Compétence principalement travaillée : Savoir utiliser le modèle des graphes

Correction :

1. Il n'existe qu'un unique chemin pour satisfaire les contraintes d'Alexia. Certains chemins auraient été envisageables, mais soit ils passent par C (le carrefour dangereux), soit ils passent par un arc orienté dans le « mauvais sens ».
M → 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 n'est pas possible (arc orienté entre 6 et 7).
M → 3 → 2 n'est pas possible, car l'arc entre 1 et 2 est orienté.
Le seul itinéraire possible, qui ne passe pas par C, et qui contient cinq sommets est :
M → 1 → 8 → 7 → M

2. Pour rentrer du travail, elle doit suivre le chemin : T → 6 → 5 → 4 → C → M.
Elle doit obligatoirement passer par le carrefour dangereux, car si elle bifurque vers le sommet 3 au lieu de passer par C, elle se retrouve alors bloquée au sommet 2.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Le coin des experts (p. 140)

20. Modélisation du réseau électrique

Compétence principalement travaillée : Savoir utiliser le modèle des graphes

Correction :

1. Pour aller de la ville A à la ville B, on peut emprunter les chemins suivants :

- A → a → d → e → i → k → B : 6 h
- A → a → d → e → f → j → l → B : 7 h
- A → a → g → h → k → B : 5h
- A → b → e → i → k → B : 5 h
- A → b → e → f → l → B : 5 h
- A → b → e → f → j → l → B : 6 h
- A → b → e → f → j → k → B : 6 h
- A → b → c → f → j → l → B : 6 h
- A → b → c → f → l → B : 5 h

Remarque : il existe d'autres chemins plus longs qui passent plusieurs fois par les mêmes sommets.

2. Les quatre chemins les plus courts (et les plus rapides) sont les chemins :

- A → a → g → h → k → B : 5 h
- A → b → e → i → k → B : 5 h
- A → b → c → f → l → B : 5 h
- A → b → e → f → l → B : 5 h

<u>Préambule pour les questions 3 et 4 :</u> Ces questions permettent d'introduire la notion de débit maximal d'un chemin.
On peut constater que la capacité d'accueil varie le long d'un chemin. Prenons l'exemple du chemin A → b → c → f → l → B. La capacité est de 3 000 voitures/h sur la partie A → b → c, mais elle diminue à 1 000 voitures/h sur c → f . Il y a donc un débit de 3 000 voitures/h sur la première partie du chemin, mais comme la capacité diminue ensuite, les véhicules vont s'accumuler en c. La capacité augmente ensuite sur la portion f → l → B, mais comme seulement 1 000 voitures/h arrivent, le débit reste donc de 1 000 voitures/h.
Le débit maximal sur le chemin A → b → c → f → l → B est donc de 1000 voitures/h.

3. Cette question peut admettre plusieurs réponses selon les hypothèses effectuées. Si on suppose que le chemin est déjà à saturation, c'est-à-dire que chaque arc fonctionne au débit maximal, la question revient à trouver un chemin dont le débit maximal Q_{max} est supérieur au débit Q de la question.
On cherche à faire circuler 20 000 voitures en 8 h, soit un débit $Q = \frac{20\ 000}{8} = 2500 \text{ voitures/h}$. Il faut donc un chemin de Q_{max} au moins égal à 3.
Les chemins A → a → g → h → k → B ou A → b → c → f → j → l → B peuvent convenir.

Si le chemin n'est pas saturé initialement, c'est-à-dire que les routes sont vides et les 20 000 voitures partent initialement de A, aucun chemin ne convient.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

4. On utilise les mêmes hypothèses que la question précédente pour cette question.
Dans le cas d'un réseau saturé on calcule donc le débit Q souhaité : $Q = \frac{30\ 000}{10} = 3000 \text{ voitures/h}$. On constate donc que n'importe quel chemin précédent peut convenir.
Dans le cas d'un chemin non saturé, l'étude est un peu plus longue. Comme la question le suggère, on va cette fois utiliser plusieurs chemins en parallèle et on va donc maximiser à la fois le Q_{max} et la durée de parcours.
On constate rapidement que l'on est limité par les chemins A → a et A → b en terme de capacité. On va donc chercher à trouver les chemins les plus courts passant par ces points et de Q_{max} = 3 000 voitures/h.
Le chemin A → a → g → h → k → B correspond à ces caractéristiques. Les premières 3 000 voitures arrivent au bout de 5 h, les 3 000 suivantes au bout de 6h, etc. On peut résumer cela dans le tableau suivant :

	Chemin 1	Chemin 2	Chemin 3
1 h	0		
2 h	0		
3 h	0		
4 h	0		
5 h	3 000		
6 h	6 000		
7 h	9 000		
8 h	12 000		
9 h	15 000		
10 h	18 000		

On constate que l'on a besoin de l'arc A → b pour réussir à transporter 30 000 voitures en moins de 10 h.

Malheureusement, il n'y a pas de chemin de 5 h de Q_{max} = 3 000 voitures/h. On utilise donc le chemin A → b → e → i → k → B sur lequel on peut faire circuler 2 000 voitures/h, et le chemin A → b → e → f → l → B sur lequel on fait circuler les 1 000 voitures/h suivantes.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

On obtient alors le tableau suivant :

	Chemin 1	Chemin 2	Chemin 3	Total
1 h	0	0	0	0
2 h	0	0	0	0
3 h	0	0	0	0
4h	0	0	0	0
5 h	3 000	2 000	1 000	6 000
6 h	6 000	4 000	2 000	12 000
7 h	9 000	6 000	3 000	18 000
8 h	12 000	8 000	4 000	24 000
9 h	15 000	10 000	5 000	30 000
10 h	18 000	12 000	6 000	33 000

On réussit donc ainsi à faire passer 30 000 voitures de A à B en 9 h.

21. Limiter les pertes

Compétence principalement travaillée : Savoir calculer la puissance dissipée par effet Joule

Correction :

1. L'intensité maximale du courant pouvant traverser un câble haute tension de section 500 mm^2 vaut : $I_{\text{max}} = 0,7 \times 500 = 350$ A

2. La puissance dissipée par effet Joule dans un câble se calcule par la relation $P = R \cdot I^2$.
La résistance d'un câble (entier) vaut $R = \dfrac{U}{I}$, soit $R = \dfrac{400\,000}{350} = 1\,143\ \Omega$
La puissance dissipée par effet Joule vaut $P = R \cdot I^2$ donc $P = 1\,143 \times 350^2 = 140$ MW.

3. Lorsque le câble est dédoublé, l'intensité est divisée par deux, soit I = 175 A.
La résistance d'un câble « dédoublé » vaut R = 571 Ω.
La puissance dissipée par effet Joule dans un des câbles vaut $P = 571 \times 175^2 = 17,5$ MW.
On en déduit donc que l'énergie dégagée est beaucoup moins importante (huit fois moins) lorsque le câble est dédoublé que lorsqu'il est entier. Ce mode de transport permet ainsi d'éviter la surchauffe des câbles.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Savoir calculer la puissance dissipée par effet Joule

Correction :

1. Calculer l'intensité maximale du courant qui peut traverser un câble haute tension de section 500 mm^2 .
L'intensité maximale du courant qui peut traverser un câble vaut :
$I_{max} = 0,7 \times 500 = 350$ A

2. Calculer la résistance R du câble.
La résistance d'un câble (entier) vaut $R = \frac{U}{I}$, soit $R = \frac{400\ 000}{350} = 1143\Omega$

3. En déduire la valeur de la puissance dissipée par effet Joule dans un câble qui transporte un courant sous 400 kV.
La puissance dissipée par effet Joule dans un câble se calcule par la relation $P = R \cdot I^2$
La puissance dissipée par effet Joule vaut donc $P = 1\ 143 \times 350^2 = 140$ MW.

4. En supposant que lorsqu'un fil est dédoublé sa résistance est divisée par deux, calculer la résistance d'un câble dédoublé.
La résistance d'un câble « dédoublé » vaut R = 571 Ω.

5. Calculer la puissance dissipée par effet Joule dans un câble dédoublé. Conclure sur l'intérêt d'une telle alternative.
Lorsque le câble est dédoublé, l'intensité est divisée par deux, soit I = 175 A.
La puissance dissipée par effet Joule dans un des câbles vaut $P = 571 \times 175^2 = 175$ MW
.
On en déduit donc que l'énergie dégagée est beaucoup moins importante (huit fois moins) lorsque le câble est dédoublé que lorsqu'il est entier. Ce mode de transport permet ainsi d'éviter la surchauffe des câbles.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 8 : Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

Présentation **2**
Activités **4**
Activité documentaire 1 : Le nucléaire comme choix énergétique (p. 142-143) 4
Activité de groupe 2 : Vers un mix énergétique pour le village d'Eklaugy (p. 144-147) 8
Groupe 1 : Experts en panneaux solaires 9
Groupe 2 : Experts en éoliennes 9
Groupe 3 : Experts en méthanisation 10
Groupe 4 : Experts en plan d'installation d'énergies renouvelables 10
Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 11
Bilan (p. 149) **17**
Exercices **19**
Zone d'échauffement (p. 150) 19
L'atelier des apprentis (p. 151) 22
Le repaire des initiés (p. 152-154) 24
Le coin des experts (p. 154) 28

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation

Le chapitre s'ouvre sur la problématique de l'énergie nucléaire, ses choix historiques, son importance en France, son mode de production, ses déchets, les emplois qu'elle génère, son avenir. Puis, les modes de production durable sont étudiés avec leurs avantages et leurs inconvénients, le tout devant conduire, dans un avenir le plus proche possible, vers un mix énergétique respectueux de la planète et de ses occupants.

Beaucoup de documents sont présentés dans chaque activité, avec des données simples, pour comprendre chaque point et inciter à approfondir, par des liens fournis, certaines notions plus importantes et/ou complexes.

La première activité documentaire peut se faire individuellement en préparation à la maison par les élèves, ou en classe, de manière collective avec les explications du professeur.

L'activité de groupe peut se faire en plusieurs temps en classe : temps d'étude des documents par chaque groupe, temps de présentation des groupes au reste de la classe, temps de débat/mise en commun avec l'ensemble de la classe. Le temps de préparation documentaire de chaque groupe peut aussi se faire en dehors de la classe, à la maison ou au CDI, pour gagner du temps d'échange ensuite en classe.

Les exercices, de différents niveaux, apportent des informations supplémentaires sur d'autres moyens de production d'énergies innovantes qui ne sont pas abordées dans les activités ni dans la synthèse du cours. Ils montrent que les possibilités sont multiples et peuvent susciter chez les élèves l'envie de faire leurs propres recherches, et pourquoi pas au professeur de demander aux élèves, au cours de mini-exposés, de présenter d'autres idées innovantes.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Aspects énergétiques des transformations nucléaires : Soleil, centrales nucléaires.
- Relier l'énergie convertie dans le Soleil et dans une centrale nucléaire à des réactions nucléaires.

Ce qui a été enseigné en première :

- Le Soleil, notre source d'énergie.
- L'énergie dégagée par les réactions de fusion de l'hydrogène qui se produisent dans les étoiles les maintient à une température très élevée.
- La puissance radiative reçue du Soleil par une surface plane est proportionnelle à l'aire de la surface. Elle 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 de la température) ;
    - du moment de l'année (variation saisonnière) ;
    - de la latitude (zonation climatique).

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Ce chapitre se place à la fin du thème sur l'énergie. Après avoir étudié les différentes problématiques de mise à disposition, transport et utilisation de l'énergie, les élèves vont réutiliser leur connaissance dans une approche globale de la thématique énergétique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- L'étude de la situation du village d'Eklaugy peut-être substitué par une étude de la situation locale. Les élèves auront alors l'avantage de connaître la région en question et ses caractéristiques. Cela peut être d'autant plus intéressant si il y a eu une installation récente de dispositifs générateurs d'électricité, ce choix pouvant alors être discuté.

Document sous licence libre Creative Commons

Activités

La première activité présente la spécificité du choix du nucléaire pour la production d'électricité. La deuxième est une étude de cas pour le choix d'un mix énergétique.

Activité documentaire 1 : Le nucléaire comme choix énergétique (p. 142-143)

Les objectifs de cette activité sont les suivants :

- analyser et comprendre, d'un point de vue global, le choix énergétique majeur qu'a été le nucléaire, du point de vue historique, du point de vu de la production énergétique, et sous l'angle économique et social.
- analyser et comprendre les impacts du nucléaire et la nécessité de le faire évoluer, en prenant en compte les facteurs suivants : approvisionnement en uranium, déchets nucléaires radioactifs, faible taux d'émission de CO_2, innovations possibles.

Ce travail d'analyse se fait par l'étude de documents (lecture et compréhension) présentant toutes ces notions, et par la recherche éventuelle d'autres documents afin d'aboutir à une synthèse objective des avantages et inconvénients de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire.

Lien avec le programme :

- Savoir-faire : analyser d'un point de vue global les impacts de choix énergétiques majeurs comme, dans cet exemple, celui du nucléaire.
- Savoirs : les choix énergétiques doivent tenir compte de nombreux paramètres : disponibilité des ressources et adéquation aux besoins, impacts (climatique, écologique, sanitaire, agricole), vulnérabilité et gestion des risques, faisabilité, conséquences économiques et sociales. L'analyse de ces éléments conduit le plus souvent à une recherche de diversification ou d'évolution des ressources (mix énergétique).

Objectifs notionnels :

- Connaître des données liées à la production d'électricité d'origine nucléaire.
- Connaître les avantages et les inconvénients de cette production.
- Comprendre que cette production doit s'inclure dans un mix énergétique.

Objectifs méthodologiques :

- Extraire et organiser des informations à partir de documents (textes, cartes, diagrammes, graphiques).
- Exploiter et interpréter des informations en faisant preuve d'esprit critique.
- Présenter une démarche de manière argumentée, synthétique et cohérente.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Lire et comprendre des documents, relier ces documents entre eux, raisonner et réaliser une synthèse des informations données.
- Remonter dans le passé avec la lecture et la compréhension de ces documents, proposer une solution pour le futur par l'analyse de ces documents.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Durée estimée : 50 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Le choix du nucléaire
Ce document présente l'aspect historique du choix du nucléaire : en 1945, création du CEA (Commissariat à l'énergie atomique) par De Gaulle pour utiliser l'énergie atomique ; en 1970, premier choc pétrolier, choix d'une politique nucléaire pour une indépendance énergétique de la France.

Document 2 : 57 réacteurs nucléaires en activité en France
Ce document présente la répartition des réacteurs nucléaires en France et leur puissance. Fessenheim est en cours de fermeture : le premier réacteur a été fermé en février 2020 et deuxième est programmé pour juin 2020.

Document 3 : Le nucléaire dans la production d'électricité
Le premier diagramme correspond à la production d'électricité en France en 2017. Il apparaît clairement que le nucléaire occupe une part importante de la production (71,6 %). Le second diagramme représente la production mondiale d'électricité en 2016. La part du nucléaire dans le monde est beaucoup moins importante que celle observée en France (10,4 %).

Document 4 : Emplois dans le nucléaire
Cet article du *Figaro* évoque la part économique et sociale du nucléaire en France : 46 milliards d'euros de chiffre d'affaire de la filière nucléaire en 2017, 410 000 emplois dont 125 000 directs.

Document 5 : Approvisionnement des centrales
Ce document traite des besoins en uranium de la France pour alimenter ses réacteurs, ainsi que les sources et les coûts de cet approvisionnement.

Document 6 : Nouvelle génération de réacteurs nucléaires
Ce document présente les intérêts des nouveaux réacteurs EPR (sûreté et rentabilité) et leurs inconvénients (durée et coût de construction).

Document 7 : Répartition des déchets nucléaires en France
Ce document présente les types de déchets nucléaires selon leur activité (faible à très haute) et leur durée de vie (de courte à longue).

Document 8 : Émission de CO_2 en France et en Allemagne
Ce graphique, représentant les émissions de CO_2 en France et en Allemagne de 1990 à 2014, indique que les émissions de l'Allemagne sont beaucoup plus importantes que celle de la France. Ce document induit que le nucléaire, beaucoup plus utilisé en France, émet moins de CO_2 (la part du nucléaire en Allemagne en 2018 est de 13,3 % selon le site connaissancedesenergies.org).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. L'énergie nucléaire, produite par fission ou fusion de noyau, est environ un million de fois plus importante que celle produite par transformation chimique. C'est pourquoi, dès 1945, la France a voulu étudier et exploiter ce type d'énergie et a créé le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Le premier choc pétrolier, dans les années 1970, ayant eu pour conséquence une hausse brutale du prix du pétrole, a conforté la France dans cette idée pour éviter de devenir trop dépendante énergétiquement des pays du Moyen-Orient. En effet, le pétrole intervenait dans de nombreux processus énergétiques de production industrielle et de transport. C'est alors que les premières centrales nucléaires sont construites.
Les autres choix possibles étaient d'autres énergies fossiles, comme le charbon et le gaz naturel, mais la France ne dispose pas suffisamment de ce type de ressources, ainsi que les filières solaires et éoliennes, mais celles-ci étant alors trop coûteuses, elles furent mises de côté.

2. Le nucléaire représente aujourd'hui plus de 70 % de la production d'énergie électrique en France contre environ 10 % de la production mondiale. Ces chiffres s'expliquent par les choix historiques faits par la France il y a une cinquantaine d'années et par la difficulté de la transition énergétique (nécessité de mettre en place des programmes de recherche pour trouver des solutions innovantes, coût des recherches et des nouvelles installations, impacts économiques et sociaux, etc.).

3.

Avantages	Inconvénients
- Énergie très productive - Chiffre d'affaire important - Ne rejette pas de CO_2 - Source d'emplois - Uranium peu cher pour l'instant	- Déchets nucléaires radioactifs (transports, stockage, nocivité pour la santé) - Nécessité d'une source d'eau à proximité d'une centrale (rivière, fleuves, mer, océan) - Problèmes au niveau du réacteur qui peuvent provoquer des explosions (exemple : Tchernobyl) - Coût important des mesures de sécurité dans une centrale - Coût et durée (10 ans) de construction importants par rapport à la durée de vie d'une centrale (30 à 40 ans) - Augmentation de l'utilisation de l'uranium augmentera le prix du minerai à long terme

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ressources complémentaires :

- http://energiedemain.e-monsite.com/pages/comparaison-de-ces-solutions-avec-le-nucleaire-et-propositions-de-solutions/avantages-et-inconvenients/avantages-et-inconvenients-de-l-energie-nucleaire.html

Document sous licence libre Creative Commons

Activité de groupe 2 : Vers un mix énergétique pour le village d'Eklaugy (p. 144-147)

Les objectifs de l'activité sont les suivants :

- faire étudier un ensemble de documents concernant un mode de production d'énergie renouvelable par un groupe d'élèves. Il y a trois modes de production d'énergie renouvelable, donc trois groupes d'élèves.
- chaque groupe réalise une synthèse des documents étudiés afin de la présenter oralement à la classe.
- un quatrième groupe est chargé de proposer un plan d'installation de type mix énergétique pour le village à partir des synthèses des trois autres groupes.

Lien avec le programme :

- Savoirs : pour que soit mise en œuvre une adaptation efficace aux changements inéluctables et qu'en soit atténué l'impact négatif, les choix énergétiques supposent une compréhension globale du système Terre.
- Savoirs : ces choix doivent tenir compte de nombreux critères et paramètres : disponibilité des ressources et adéquation aux besoins, impacts (climatique, écologique, sanitaire, agricole), vulnérabilité et gestion des risques, faisabilité, conséquences économiques et sociales. L'analyse de ces éléments conduit le plus souvent à une recherche de diversification ou d'évolution des ressources (mix énergétique).
- Savoir-faire : dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés.

Objectifs notionnels :

- Principe de fonctionnement d'un panneau solaire, d'une éolienne, d'un méthaniseur et production d'énergie. Avantages et inconvénients de chaque méthode de production.
- Sur les bases des avantages et inconvénients de chaque méthode, principe et intérêts d'un mix énergétique d'un point de vue écologique, économique et social.

Objectifs méthodologiques :

- Extraire et organiser des informations à partir de documents (textes, schémas, photos, données chiffrées).
- Exploiter et interpréter des informations en faisant preuve d'esprit critique.
- Présenter oralement une synthèse de documents de manière argumentée, synthétique et cohérente.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Lire et comprendre des documents, relier ces documents entre eux, raisonner et réaliser une synthèse des informations données.

Durée estimée : 55 minutes (présentation du travail, constitution des groupes, analyse des documents et synthèse). 30 minutes de présentation orale et questions/réponses/débat.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Groupe 1 : Experts en panneaux solaires

Présentation des documents

Document 1 : Principe de fonctionnement des panneaux solaires
Ce document explique comment un panneau solaire capte l'énergie radiative pour la transformer en énergie thermique et/ou électrique dans les panneaux solaires thermiques, photovoltaïques et hybrides.

Document 2 : Points forts et points faibles des panneaux solaires photovoltaïques
Ce document présente les points forts et les points faibles des panneaux photovoltaïques, permettant de montrer leur intérêt dans un mix énergétique et non dans une utilisation unique.

Document 3 : Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque
Ce schéma explique le principe de production d'électricité continue d'un panneau photovoltaïque éclairé par un rayonnement solaire. Il montre les trois couches constituant un panneau : silicium et bore, jonction, silicium et phosphore, permettant cette production d'électricité par conversion du rayonnement solaire en courant alternatif. Ce document est en lien avec une vidéo détaillant le principe.

Ressources complémentaires :
- Lien vidéo du fonctionnement d'un panneau solaire : LLS.fr/ESTP144

Groupe 2 : Experts en éoliennes

Présentation des documents

Document 4 : Dimension acoustique d'un projet éolien
Ce document présente, de manière chiffrée, la perception du bruit généré par une éolienne selon la distance qui la sépare du lieu de perception du bruit, en décibel (dB). Il compare les bruits générés par une éolienne à d'autres bruits de la vie courante.

Document 5 : Schéma de fonctionnement d'une éolienne
Ce schéma montre les principaux constituants d'une éolienne : pales, mât, nacelle (rotor, multiplicateur, alternateur). Ce document est en lien avec une vidéo en détaillant le principe.

Document 6 : Principe d'une éolienne
Le principe de fonctionnement d'une éolienne est expliqué en s'appuyant sur les principaux constituants schématisés dans le document 5 et en résumant les explications de la vidéo en lien avec le document 5.

Document 7 : L'éolien, une dégradation des paysages ?
Cette photo d'un parc éolien pose la question de la dégradation du paysage en lien avec cette installation. À chaque élève/observateur d'apporter sa réponse à cette question en argumentant.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ressources complémentaires :

- Lien vidéo du fonctionnement d'une éolienne : LLS.fr/ESTP145

Groupe 3 : Experts en méthanisation

Présentation des documents

Document 8 : Principe d'un méthaniseur
Ce document explique les principes de production d'énergie d'un méthaniseur : thermique, électrique, mécanique. Il montre l'intérêt d'un dispositif, qui, à lui seul est mixte !

Document 9 : Fonctionnement d'un méthaniseur
Ce schéma montre les principaux constituants d'un méthaniseur : cuve de méthanisation dans laquelle est déversée la matière qui va fermenter (production du biogaz), moteur à gaz, alternateur (production d'électricité), cuve de récupération du digestat (fertilisant).

Document 10 : Produire du carburant vert sur son exploitation, c'est possible
Ce document illustre l'exemple d'un agriculteur qui réussit à produire et à utiliser son carburant. Il montre ainsi des avantages de la méthanisation, à l'inverse du document précédent.

Document 11 : Les limites de la revalorisation
Cet extrait d'article présente des inconvénients de la méthanisation (coût de maintenance, quantité de matière première limitée selon les exploitations, obligation d'acheter cette matière première).

Ressources complémentaires :

- Lien vidéo décrivant une installation agricole avec un méthaniseur et toutes ses utilisations : LLS.fr/ESTP146

Groupe 4 : Experts en plan d'installation d'énergies renouvelables

Présentation des documents

Document 12 : Les fluctuations de la production d'électricité renouvelable
Ce document présente les effets des fluctuations des sources d'énergie renouvelable sur la production d'énergie électrique : température, précipitations, durée d'ensoleillement, état des troupeaux, récoltes, etc.

Document 13 : Les fluctuations de la consommation d'énergie
Ce texte résume les fluctuations de la consommation d'énergie électrique : saisons (chauffage, climatisation), conditions économiques (des crises engendrent de moindres

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

consommations), etc. La maison bioclimatique a une architecture tenant compte de son environnement afin d'adapter sa consommation.

Document 14 : Émissions des gaz à effet de serre selon la source d'énergie
Ce document donne les valeurs (minimum, médiane, maximum) en kWh des émissions équivalent CO_2 selon les sources d'énergie (charbon, éoliens, gaz, hydraulique, nucléaire, photovoltaïque). Il montre que le charbon et le gaz sont les principaux émetteurs de CO_2.

Document 15 : Le village d'Eklaugy
Cette photographie illustre la commune fictive d'Eklaugy, accompagnée d'une légende précisant son ensoleillement selon les périodes de l'année et de la journée, ainsi que les vents la balayant. Ce document permettra au groupe 4 de proposer un mix énergétique tenant compte de ses particularités.

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Après avoir visionnée la vidéo, le résumé des notions décrivant les constituants d'un panneau solaire, peut se faire de la façon suivante :
« Un panneau solaire est constitué :
- d'une plaque de silicium ;
- d'une plaque de silicium enrichie en atomes de phosphore, qui possèdent un surplus d'électrons par rapport aux atomes de silicium, et qui est placée au-dessus de la première ;
- d'une plaque de silicium enrichie en atomes de bore, qui possèdent un déficit d'électrons par rapport aux atomes de silicium, positionnée en-dessous de la première.

La plaque enrichie en phosphore constitue la borne négative d'une pile tandis que la plaque enrichie en atome de bore constitue la borne positive d'une pile. Chacune est reliée à un fil, constituant ainsi un circuit électrique.
Les élèves exposent oralement ce résumé en s'appuyant sur le schéma du document 2.

2. Les élèves expliquent alors oralement le fonctionnement du panneau solaire en s'appuyant toujours, pour chaque phrase d'explication, sur le schéma du document 2 :
« Lorsque la plaque de silicium est exposée au rayonnement solaire, les électrons des atomes de silicium s'agitent. Pour créer un courant électrique, il faut créer d'un côté un surplus d'électrons et de l'autre un déficit d'électrons. Ces conditions sont obtenues grâce aux atomes de phosphore, possédant un surplus d'électrons par rapport au silicium, qui sont placé sur la couche supérieure de silicium. Et sur la couche inférieure du silicium sont placés des atomes de bore qui possèdent un déficit d'électrons. On a alors la configuration d'une pile : d'un côté la borne négative avec un surplus d'électrons et de l'autre, la borne positive avec un déficit d'électrons. Les deux bornes sont reliées par un fil conducteur. Lorsque le circuit est fermé et que de la lumière arrive sur les panneaux, alors du courant est créé. ».
Les élèves peuvent ensuite se munir d'une cellule photovoltaïque utilisée en TP d'électricité, si le laboratoire en dispose, pour montrer la conversion de l'énergie lumineuse en courant électrique lorsque cette cellule est éclairée, en la reliant à un petit circuit électrique qui

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

contiendrait soit une DEL, soit un petit moteur, afin de constater que la DEL s'éclaire et que le moteur tourne.
Ils exposent enfin les avantages et inconvénients des panneaux solaires en reprenant les arguments du document 3. Ils peuvent ajouter quelques arguments supplémentaires en s'appuyant sur l'article complet dont est extrait le document 3 :
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis-ademe-sur-solaire-photovoltaique-2013.pdf

3. Les élèves doivent développer l'idée que le panneau solaire s'inscrit parfaitement dans un mix énergétique avec les arguments suivants :

- un panneau solaire capte l'énergie radiative du Soleil et la transforme en énergie thermique et/ou électrique seulement s'il est éclairé ;
- ainsi, son fonctionnement est très dépendant des conditions climatiques (ensoleillement et saison) ;
- il peut être de toutes tailles et se positionner dans n'importe quel lieu.

Le village d'Eklaugy peut positionner des panneaux solaires dans des zones publiques pour alimenter le réseau, et dans des zones privées, comme les toits des maisons, pour produire de manière propre et faire des économies.

Groupe 2 :

1. Les élèves réalisent un schéma d'un alternateur : ils peuvent très facilement trouver un schéma sur internet. Ils peuvent également se munir d'un alternateur de bicyclette, si le laboratoire de l'établissement en dispose. L'idéal est d'en avoir un démonté et un relié à une petite ampoule électrique. Les constituants de l'alternateur, puis son fonctionnement peuvent alors être décrits :
« L'alternateur est constitué d'un aimant mobile, le rotor, et d'une bobine constituée d'un enroulement de fil de cuivre, le stator. Lorsque le rotor est en mouvement, il génère un courant électrique dans la bobine. Un transformateur, situé après l'alternateur, élève la tension produite dans l'alternateur. L'électricité est alors acheminée par câbles souterrains ou sous-marin. Puis, la tension sera encore élevée pour être transportée sur les lignes très hautes tensions du réseau. »

2. Après avoir étudié le document 6 et visionné la vidéo en lien, les élèves peuvent résumer le fonctionnement de l'éolienne et l'exposent oralement en s'appuyant sur le schéma du document 5 :
« L'hélice, appelée rotor, composée généralement de trois pales, se met à tourner sous l'effet d'un vent d'au moins 10 km/h. La nacelle sur laquelle elle est fixée s'oriente toujours pour être face au vent. Les pales pivotent pour capter un maximum de vent. Si le vent dépasse 90 km/h, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner pour des raisons de sécurité. Dans la nacelle, l'hélice fait tourner un axe. Sa vitesse de rotation n'étant pas suffisante pour générer de l'électricité, un multiplicateur augmente cette vitesse et la transmet à un second axe qui fait à son tour tourner un alternateur. L'alternateur transforme l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique. Un transformateur, situé après l'alternateur, élève la tension produite dans l'alternateur. L'électricité est alors acheminée par câbles souterrains ou sous-marin. Puis, la tension sera encore élevée pour être transportée sur les lignes très hautes tensions du réseau. »

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Les élèves peuvent alors utiliser l'alternateur de bicyclette. En faisant tourner le galet de l'alternateur de la bicyclette, ils montrent que le galet qui tourne représente les pales reliées au rotor et au multiplicateur. L'énergie mécanique fournie par la main représente l'énergie mécanique fournie par le vent aux pales. L'ampoule qui s'allume illustre ainsi clairement le fait que l'éolienne produit de l'électricité.
Les élèves exposent ensuite les avantages et inconvénients des éoliennes après réflexion et en effectuant éventuellement quelques recherches, ainsi qu'en s'appuyant sur le document 4 :

- avantages : non polluant, pas de gaz à effet de serre, pas de déchets toxiques ou radioactifs, peu d'emprise au sol, coûts de production et d'installation en diminution depuis plusieurs années ;
- inconvénients : ne fonctionne que lorsqu'il y a du vent, mais pas trop non plus, impact sonore, visibilité dans le paysage.

3. Les élèves doivent développer l'idée que l'éolien s'inscrit parfaitement dans un mix énergétique avec les arguments suivants :

- une éolienne capte l'énergie mécanique du vent et la transforme en énergie électrique seulement s'il y a du vent ;
- ainsi, son fonctionnement est très dépendant des conditions climatiques (vent et saison) ;
- elle peut se positionner facilement, bien que pas trop proche des habitations.

Le village d'Eklaugy peut positionner des éoliennes loin des habitations, mais à proximité du village qui reçoit du vent, afin d'alimenter le réseau et ainsi, en plus de produire de manière propre, de faire des économies.

Groupe 3 :

1. Après avoir étudié le document 8 et visionné la vidéo en lien, les élèves peuvent faire un résumé des constituants et du fonctionnement d'un méthaniseur et l'exposer oralement en s'appuyant sur le schéma du document 9 :
« Un méthaniseur est composé d'une cuve appelée digesteur dans laquelle est placée la matière organique à fermenter, d'un moteur à gaz qui fait tourner un alternateur qui produit l'électricité. Il contient également un réservoir permettant de récupérer le digestat, fertilisant.
De la matière organique (déjection animale ou matière végétale) est placée dans un digesteur fermé hermétiquement, appelé aussi réservoir à biogaz. La fermentation de la matière organique produit du biogaz utilisé pour faire fonctionner un moteur à gaz, relié à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, pouvant alimenter toute l'installation agricole ou être envoyée au réseau. Le digestat, produit résiduel créé par la fermentation, est réutilisé comme engrais naturel, pouvant être exploité directement sur l'installation agricole. »

2. Les élèves exposent oralement le fonctionnement d'un méthaniseur, comme décrit ci-dessus, en s'appuyant sur le schéma du document 9.
Ils exposent ensuite les avantages et inconvénients d'un méthaniseur en s'appuyant sur les documents 10 et 11 et en effectuant éventuellement quelques recherches supplémentaires.
On pourra s'appuyer sur l'article suivant : https://www.fournisseurs-electricite.com/guides/environnement/methanisation

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Avantages :

- une double valorisation de la matière organique et de l'énergie ;
- une diminution de la quantité de déchets organiques à traiter et, par conséquent, un allègement des coûts des autres filières de traitement des déchets ;
- une diminution des émissions de gaz à effet de serre par substitution de l'utilisation des énergies fossiles ;
- un traitement possible des déchets organiques graisseux ou très humides, non compostables en l'état ;
- une limitation des émissions d'odeurs du fait de digesteur hermétique et de bâtiments clos équipés de traitement d'air.

Inconvénients :

- les déchets entrants doivent être disponibles sur la durée afin de créer une filière rentable et pérenne ;
- la valorisation énergétique possible du biogaz doit être utilisée préférentiellement sur site, en local, en cas de cogénération. En effet, l'injection dans le réseau de gaz naturel peut être compliquée ou impossible ;
- l'incinération et/ou le stockage des déchets non dangereux pour les fractions de déchets non organiques ne pouvant pas être méthanisées doivent être pris en compte ;
- le compostage pour traiter les déchets ligneux mal adaptés à la méthanisation doit être envisagé, ainsi que la mise en place d'un traitement des excédents hydriques du processus pour les grosses installations ;
- l'utilisation du digestat peut conduire à une réelle substitution énergétique et à une valorisation agronomique.

3. Les élèves doivent développer l'idée que la méthanisation s'inscrit parfaitement dans un mix énergétique avec les arguments suivants :

- la méthanisation est un mix énergétique à elle seule, car elle recycle la matière organique non utilisable (déchets végétaux et déjection animale voire humaine), produit de l'électricité pour alimenter l'installation agricole et/ou le réseau, et produit des engrais ;
- elle fait partie d'une exploitation agricole qui peut alors être quasiment autonome énergétiquement ;
- Eklaugy peut bénéficier de l'énergie produite par une ou plusieurs exploitations agricoles installée sur sa commune.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Groupe 4 :

1. Les facteurs influençant la production et la consommation annuelles d'énergie sont les suivants :

Type de production	Production	Consommation
Photovoltaïque	- Durée d'ensoleillement	- Conditions climatiques : hiver froid (besoin de chauffer), été chaud (besoin de climatisation) - Conditions économiques : période de crise (économie d'énergie : moindre consommation de lumière, chauffage, de cuisson, de bain, etc.) ; période faste (consommation sans restriction)
Hydraulique	- Zone de stockage d'eau - Précipitations - Température	
Éolien	- Régularité des vents	
Méthanisation	- État des troupeaux - État des récoltes	

2. Les dépendances de chaque source de production, traduisant leurs inconvénients, sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Type de production	Inconvénients (dépendances)
Photovoltaïque	- Ensoleillement
Hydraulique	- Précipitations - Lieu : bassins de stockage de l'eau, inclinaison des canaux de conduit d'eau sur les turbines
Éolien	- Régularité des vents
Méthanisation	- État des troupeaux - État des récoltes - Conditions climatiques qui influent sur l'état des troupeaux et des récoltes

3. Les choix énergétiques possibles pour le village d'Eklaugy sont un mix des installations suivantes :
   - des panneaux photovoltaïques du côté de la vallée le plus exposé au soleil (pour la production d'électricité) ;
   - des panneaux solaires sur les toits des maisons, du côté de la vallée le plus exposé au soleil (pour le chauffage domestique) ;
   - des éoliennes le long du couloir le plus exposé au vent (pour la production d'électricité) ;

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

- un ou plusieurs méthaniseurs regroupant, éventuellement, plusieurs exploitations agricoles, minimisant ainsi les coûts d'installation et d'entretien (pour la production d'électricité et de biocarburants pour les déplacements des personnes).

La présence d'eau n'est pas stipulée à proximité du village (lac, bassin de stockage, rivière, torrent, etc.). Ainsi, on ne sait pas si le village peut accueillir une installation hydraulique, bien que dans une zone montagneuse, ce type d'installation soit courant.

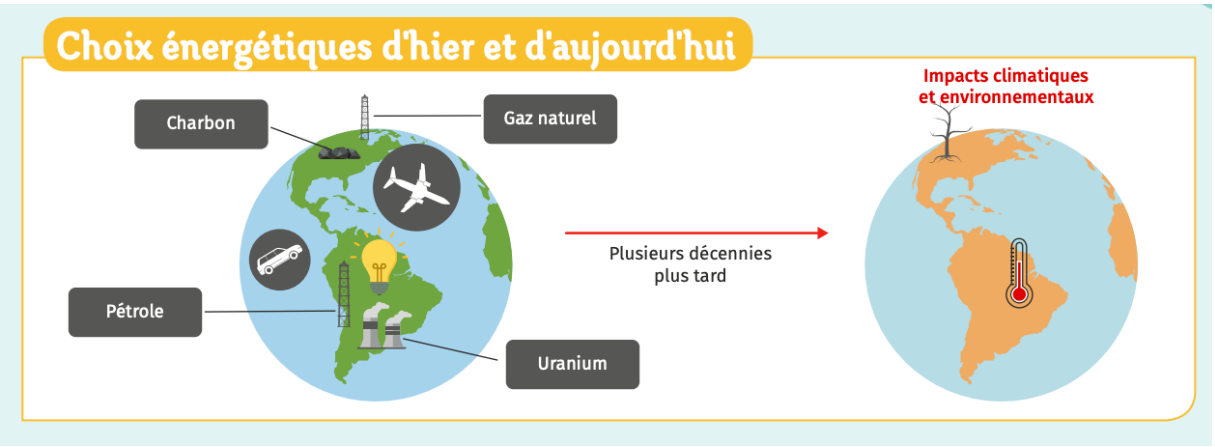
Ce mix énergétique permettrait au village d'Eklaugy, à long terme, d'être indépendant énergétiquement en produisant son énergie de manière écologique et durable.

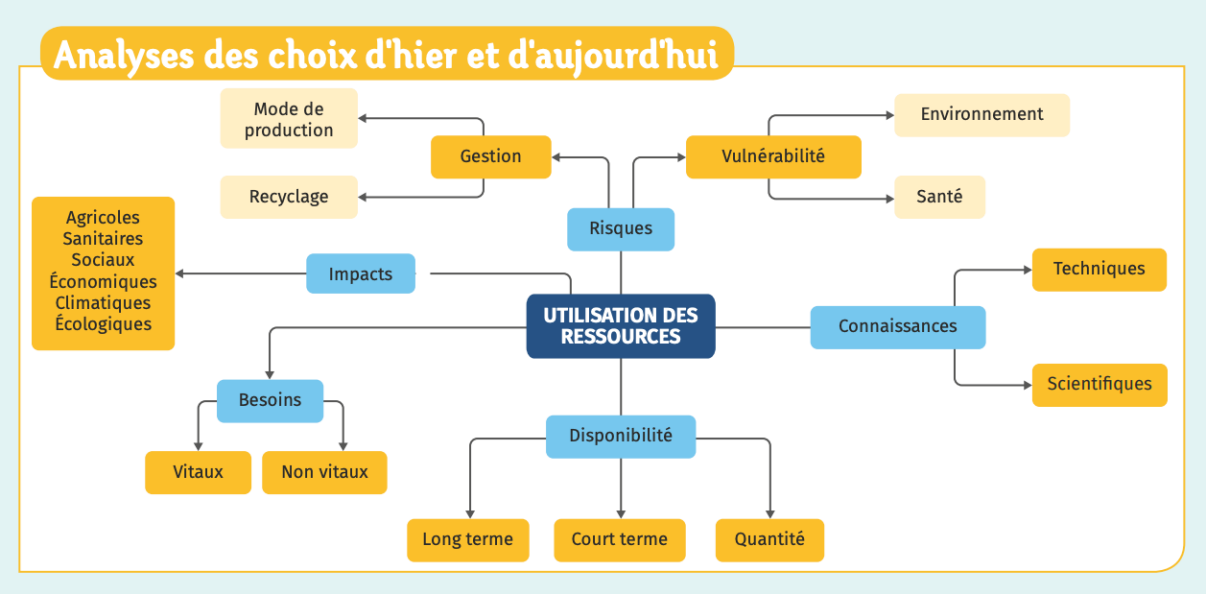
La question des coûts d'investissement est un facteur déterminant dans ces choix. Il reste à les étudier.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

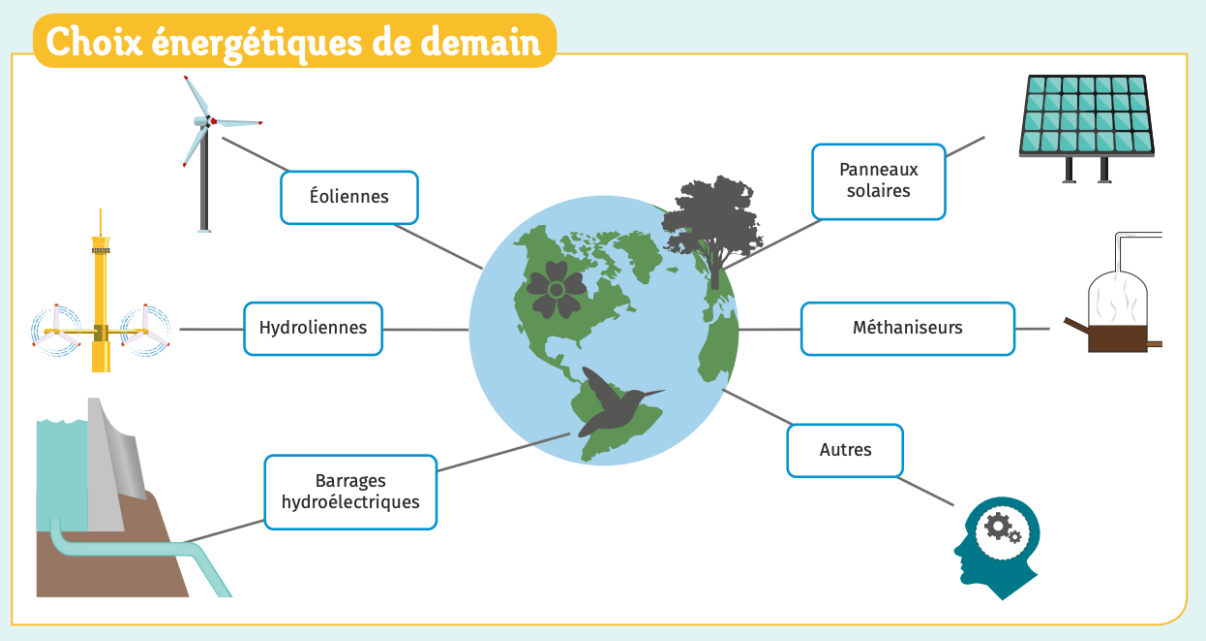
Bilan (p. 149)

Le cours reprend synthétiquement toutes les notions abordées dans les activités. Cependant, n'est pas abordé, ou très peu (seulement dans le document 1 de l'activité 1), l'aspect financier des choix énergétiques passés et de la transition énergétique à venir. C'est pourtant un élément essentiel qui est abordé dans d'autres cours (économie, histoire, etc.)





Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA



Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 150)

1. Inconvénients des centrales thermiques.

a. Les déchets produits par ces centrales sont :

Centrales	Déchets
Thermique classique	Dioxyde de carbone : gaz à effet de serre. Cendres (présence de métaux lourds), gaz et poussières, particules fines. Eaux de refroidissement : source de réchauffement et déséquilibre des milieux aquatiques environnants.
Thermique nucléaire	Radioactifs, risques pour : - l'homme : brûlures, nausées, radiodermites, fibroses, cataracte, modifications des cellules sexuelles, cancers de type leucémie, etc. - l'environnement : modification de l'ADN de la faune et de la flore, augmentation de la radioactivité de minéraux naturellement radioactifs mais qui deviennent alors très radioactifs donc dangereux.

b. Pour les centrales nucléaires et les centrales à charbon, les déchets, les dangers pour l'environnement et les personnes sont :

Centrales	Déchets	Dangers pour l'environnement	Dangers pour les personnes
Nucléaire	Radioactifs	Dispersion puis retombée sur la surface des sols des substances radioactives, contamination des sols et de la végétation, modification de la chaîne alimentaire.	Brûlures, nausées, cancers, destruction ou modification de l'ADN des cellules.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Charbon	Cendres (présence de métaux lourds), gaz et poussières, particules fines.	Rejets dans l'atmosphère, pluies acides.	Problèmes respiratoires, cancers.

2. Production électrique en Allemagne.

a. Source nucléaire : 11,6 %.
Source fossile : charbon (14,4 %) + gaz naturel (13,1 %) = 17,5 %
La part du fossile est supérieure à celle du nucléaire.
b. Il y a plus de rejets immédiats dans l'atmosphère avec le fossile, mais moins de risques environnementaux générés par la part plus faible du nucléaire.

3. Production d'électricité à partir d'énergie radiative.

a. Un panneau solaire photovoltaïque transforme une partie de l'énergie du rayonnement solaire en courant électrique continu, lui-même transformé en courant alternatif par un ondulateur.
b. Un panneau solaire thermique transforme une partie de l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Celle-ci est transférée à un fluide caloporteur qui circule dans un ballon de stockage d'eau sanitaire permettant de la chauffer. Une autre partie du rayonnement solaire est convertie en énergie électrique continue transformée en énergie alternative par un ondulateur.

4. Éoliennes.

a. Les éoliennes fournissent une énergie verte car elles utilisent le vent pour faire tourner leurs pales. Or, le vent est une énergie renouvelable.
b. L'éolienne utilise la force du vent, tandis que la maréolienne utilise la force des marées.

5. Méthaniseur.

a. Un méthaniseur peut être qualifié « d'usine de traitement de déchets » car il utilise des matières de types organiques (matières qui fermentent).
b. Un méthaniseur peut être qualifié de convertisseur d'énergie renouvelable, car la matière organique se forme de façon régulière, donc sa transformation aussi.

6. Analyser la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe à l'aide du schéma et des questions suivantes :

a. L'eau (de la mer, des précipitations, du ruissellement) s'infiltre selon le cycle de l'eau (source renouvelable) et le volcan fournit la chaleur de façon renouvelable à échelle humaine.
b. La production d'eau peut ne pas être régulière si l'infiltration ne l'est pas, même chose pour la chaleur selon l'activité du volcan.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

7. Qu'est-ce qu'un mix énergétique ?

b. L'utilisation de différentes ressources pour la production d'énergie

Un mix énergétique a pour but d'utiliser des sources d'énergie renouvelables. Chaque ressource est utilisée pour éviter la pollution, les déchets, les dangers, en exploitant au mieux tous les avantages et en limitant au maximum les inconvénients dans un souci écologique.

8. Identifier les bonnes propositions. Les choix énergétiques doivent tenir compte :

a. des ressources disponibles.

L'objectif est de ne pas les épuiser.

b. de l'adéquation entre ressources disponibles et besoins.

Il ne faut pas inciter à consommer plus ou être contraint de stocker l'énergie.

c. des impacts climatiques et écologiques en priorité.

Ceux-ci n'étaient pas une priorité auparavant, mais ils le deviennent maintenant pour de nombreux états.

A. Comment est produite l'électricité par un panneau solaire ?

Au sein d'un panneau solaire, l'arrivée d'un photon arrache un électron à un semi-conducteur. Ainsi une énergie radiative est convertie en énergie électrique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 151)

9. Le mix énergétique de demain

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques à une échelle globale

Correction :

1. Les énergies qui émettent le plus de CO_2 sont : le charbon, le pétrole, le gaz, la biomasse et les biocarburants (moins que les trois premiers).

2. Les prévisions du GIEC envisagent :
- une même utilisation du charbon (toujours 25 %) ;
- une diminution de 3 % du pétrole (de 30 à 27 %) ;
- une augmentation de 2 % du gaz (de 22 à 24 %) ;
- une même utilisation de la biomasse et des biocarburants (3 %).

L'augmentation dans l'atmosphère de la teneur en gaz à effet de serre, le CO_2, est directement liée au réchauffement climatique. Le GIEC prévoit une diminution minime de ces rejets par la diminution de 3 % de l'utilisation du pétrole et l'augmentation de 2 % de l'utilisation du gaz. Ces prévisions généreraient donc une limitation de l'augmentation de la température de la planète.

3. Ce scénario n'envisage pas de manière significative une diminution des rejets de gaz à effet de serre, donc une diminution de la température.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Utiliser une représentation graphique pour étudier des taux d'émission de CO_2

1. Écrire les équations de combustion du carbone, présent dans le charbon, et du méthane, gaz naturel, montrant l'émission de dioxyde de carbone lors de la combustion des combustibles fossiles.

Les équations de combustion sont :
- pour le carbone : $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- pour le méthane : $CH_4 + 2\ O_2 \rightarrow CO_2 + 2\ H_2O$

Ces équations montrent, dans les deux cas, la production de dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre.

2. Expliquer comment la production de CO_2, gaz à effet de serre, agit sur l'augmentation de la température de la planète et justifier en quoi les choix pour 2035 limiteront cette augmentation.

Le CO_2 absorbe les rayonnements infrarouges émis par la surface terrestre, ce qui contribue à l'effet de serre, c'est-à-dire à l'augmentation de la température de la surface terrestre.
Le gaz émet deux fois moins de CO_2, donc utiliser moins de charbon au profit du gaz équivaut à moins d'émission de CO_2 et à une limitation de l'augmentation de la température.
Les choix pour 2035 envisagent une augmentation de la consommation du gaz de 2 %, une diminution du pétrole de 6 % et du charbon de 12 %. Ainsi, il y aurait une diminution globale de production de CO_2 donc une diminution de l'augmentation de la température de la surface terrestre.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

10. Des obstacles à la sortie du nucléaire

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques à une échelle globale

Correction :

1. La France a fait le choix du nucléaire dans les années 1970 pour être indépendante énergétiquement à la suite des premiers chocs pétroliers et des tensions au Moyen-Orient qui généraient de fortes fluctuations du prix du pétrole.

2. Les problèmes qu'elle rencontre aujourd'hui sont les suivants :
   - les pertes des emplois que la diminution du nucléaire induit. Il faut former les personnes à d'autres emplois.
   - le retard technologique dans l'utilisation des énergies renouvelables. La France dépend des pays qui ont pris de l'avance sur ces domaines, technologiquement, et donc financièrement. Elle doit mettre en place des programmes de recherche pour rattraper son retard.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques à une échelle globale

1. Rappeler la raison pour laquelle la France a fait le choix du nucléaire dans les années 1970.
La France a fait le choix du nucléaire dans les années 1970 pour être indépendante énergétiquement à la suite des premiers chocs pétroliers et des tensions au Moyen-Orient qui généraient de fortes fluctuations du prix du pétrole.

2. Identifier la stratégie développée actuellement par la France en terme de technologies de la filière renouvelable. Pour quelles raison cette stratégie est-elle adoptée.
Aujourd'hui, sa stratégie principale consiste en l'importation depuis l'étranger. Cela s'explique principalement par des raisons économiques : certains pays ayant une avance importante dans ces domaines, il serait plus cher de développer les outils technologiques en France que de leur acheter du matériel.

3. Donner des risques de cette stratégie non présentés dans le document.
Parmi les problèmes de cette stratégie, on peut citer :
- La dépendance aux pays producteurs : en cas de crise dans ces pays (crise sanitaire, guerre, pénurie, etc.) la France ne pourrait alors plus s'approvisionner.
- Des critères économiques : l'économie à court terme ne compense pas forcément l'absence d'investissement industriel dans ces domaines.
- Des critères écologiques : la France fait partie des pays pour lesquels la réglementation en terme d'écologie est la plus stricte. Certains pays sont beaucoup moins rigoureux, et se fournir chez eux pollue plus que produire en France.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 152-154)

11. L'avenir du charbon dans le mix énergétique mondial

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques à une échelle globale

Correction :

1. L'origine de l'augmentation de la demande de charbon entre 2000 et 2012, largement attribuée à la Chine, pays émergent, est due à son fort développement industriel et à une part très importante de sa production d'électricité par des centrales au charbon car elle est à la fois productrice et consommatrice de charbon. La plupart des autres pays ont également connu une croissance de leur demande, mais beaucoup moins importante.

2. La COP qui se réunit chaque année, fixe des objectifs de réduction de production de gaz à effet de serre et contribue à favoriser le mix énergétique depuis 1992. Les effets de ses accords commencent à être visibles en 2018 où la part du charbon commence à stagner dans tous les pays.

Correction de l'exercice décliné en version expert :

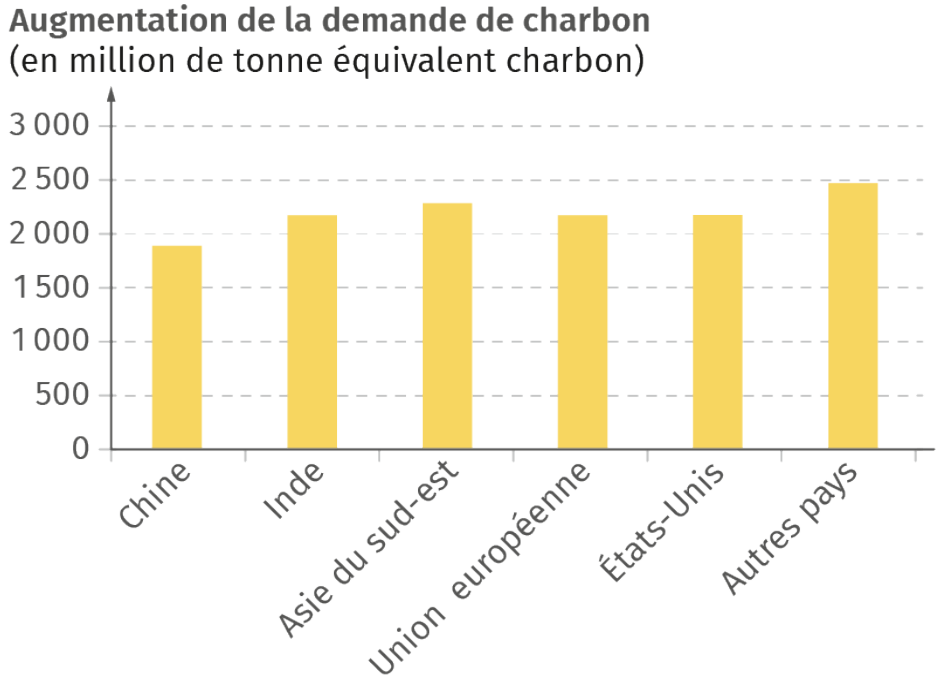
Compétence principalement travaillée : Analyser un graphique et des informations pour montrer la part du charbon dans la consommation d'énergie

1. Calculer l'augmentation de la demande en charbon pour chaque pays entre 2000 et 2020. Réaliser un histogramme de cette augmentation par pays.
L'augmentation approximative de la demande de charbon pour chaque pays entre 2000 et 2020 est consignée dans le tableau suivant :

Pays	Chine	Inde	Asie Sud-Est	États-Unis	Union européenne	Autres pays
Augmentation de la demande de charbon (en millions de tonnes équivalent charbon)	1 900	2 200	2 300	2 200	2 200	2 500

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Soit l'histogramme correspondant :



2. Commenter cet histogramme. Justifier que cette évolution de la demande mondiale de charbon est amenée à changer.
Tous les pays présents sur l'histogramme ont vu leur demande de charbon augmenter entre 2000 et 2020. Cette demande doit être amenée à diminuer puisque le charbon est un grand producteur de CO_2, gaz à effet de serre responsable de l'augmentation de la température terrestre. Afin de prévenir cette augmentation de température, chaque pays doit limiter sa consommation.

12. Une centrale photovoltaïque peu commune

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques dans un cas particulier

Correction :

1. Cette centrale flottante prend appui sur une surface liquide et « ne laisse pas de marques dans les sols à long terme ». Elle permet « l'utilisation de bassins d'eau non exploitables » ce qui n'altère pas l'environnement. Elle « ne génère pas de pollution de l'eau », la vie aquatique pourra même s'y établir au fil des années. L'eau refroidit les panneaux et ne provoque pas d'augmentation de température contrairement aux panneaux classiques.

2. L'eau stockée dans les barrages étant retenue pour être ensuite canalisée vers des turbines reliées aux alternateurs produisant l'électricité, elle est doublement utilisée comme support et refroidissement des panneaux. Ceci minimise l'impact sur l'environnement et augmente le rendement de la production. C'est un bon mix énergétique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Extraire des informations pour montrer l'intérêt innovateur du photovoltaïque flottant

1. En quoi le principe de production de cette centrale est-il 100 % renouvelable ?
Cette centrale est 100 % renouvelable car elle utilise l'énergie de rayonnement solaire qui est transformée en énergie électrique. Elle repose sur une surface d'eau « qui permet naturellement de refroidir les panneaux et d'améliorer de 5 à 10 % le rendement par rapport à des panneaux solaires classiques ». Si le niveau d'eau subit une évaporation sur les zones hors panneaux flottants, cette eau sera naturellement renouvelée par les précipitations et un niveau constant sera maintenu, permettant un refroidissement naturel.

2. Pourquoi l'installation de ces centrales flottantes sur les retenues d'eau des barrages de centrales hydrauliques permettrait une double source de production d'électricité ?
L'installation de centrales flottantes sur les retenues d'eau de barrage de centrales hydrauliques permettrait une double source de production de l'électricité, car l'eau stockée dans les barrages, retenue pour être ensuite canalisée vers des turbines puis alternateurs serait une source de production de l'énergie électrique, et les panneaux solaires une deuxième. Cette installation est à elle seule un mix énergétique.

13. Programmation pluriannuelle de l'énergie

Compétence principalement travaillée : Extraire des informations de documents

Correction :

1. Les mesures de la PPE doivent améliorer nettement la qualité de l'air et réduire les impacts sur le climat de la consommation d'énergie. En effet, elle envisage :
- la baisse de la consommation des énergies les plus carbonées ;
- de substituer aux énergies fossiles des énergies décarbonées.

Ce qui aura pour conséquences la réduction de la production de gaz à effet de serre, dont 70 % résulte de notre consommation d'énergies fossiles (responsable de l'augmentation de la température de surface de la Terre), et le rejet dans l'atmosphère des particules fines.

2. Les principaux moyens de réduction de la consommation à l'échelle individuelle sont :
- ne pas laisser des appareils en fonctionnement s'ils ne sont pas utilisés (ordinateurs, écrans, ampoule, chauffage en cas d'absence) ;
- ne pas utiliser le mode veille des appareils (gros consommateur d'énergie), les éteindre ;
- utiliser des appareils électroménagers de classe A (le plus écologique) ;
- limiter la consommation d'eau chaude (douche plutôt que bain, ne pas laisser couler l'eau inutilement, etc.) ;
- bien isoler les logements pour éviter les pertes énergétiques, été comme hiver ;
- se déplacer en transport en commun ou individuel propre (vélo, véhicule propre).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Extraire des informations de documents

1. Identifier les deux axes principaux d'évolution en terme de politique énergétique de la PPE.
La PPE de janvier 2019 prévoit à la fois la réduction de la consommation d'énergie et la transition vers l'utilisation d'énergie issue de ressources durables.

2. Identifier l'évolution prévue de la consommation d'énergie selon les domaines.
La PPE prévoit la diminution de consommation de charbon et de pétrole, et de gaz dans une moindre mesure. Elle prévoit aussi l'augmentation de la consommation de chaleur renouvelable et la stagnation de la consommation électrique.

14. L'usine à gaz

Compétence principalement travaillée : Extraire des informations de documents

Correction :

1. La méthanisation utilise la matière organique pour la faire fermenter dans de grandes cuves afin de produire du méthane. Celui-ci sera utilisé pour produire de l'électricité ou du biocarburant qui permettra le déplacement des machines agricoles. La matière organique qui fermente produit également du digestat utilisé comme engrais. La source d'énergie exploitée dans cette usine est renouvelable, puisque ce sont des déchets recyclés. L'électricité produite peut être utilisée sur l'exploitation agricole ou transmise au réseau électrique : dans les deux cas, une économie est réalisée. Elle permet à l'exploitant de rentabiliser son exploitation et de gagner sa vie. L'environnement est préservé, car l'énergie électrique produite est propre, de même que les engrais réutilisés sur l'exploitation, ou sur d'autres exploitations voisines. Il n'y a pas de pertes énergétiques et financières par transport de l'énergie.

2. Pour compléter ce mix énergétique, des panneaux solaires peuvent être installés sur les toits de l'exploitation, afin de subvenir aux besoins en eau chaude ou de produire un complément d'électricité. L'ajout d'une éolienne à proximité de l'exploitation peut être envisagée si la région est suffisamment venteuse.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le coin des experts (p. 154)

15. Préparer le voyage dans l'espace sans polluer

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques dans un cas particulier

Correction :

1. Canopée permet de réduire de 30 % la consommation de carburant ainsi que l'émission de CO_2 et de particules fines générant une très forte pollution. Son système hybride de propulsion utilise une source renouvelable l'énergie, le vent, ce qui réduira nettement son impact environnemental.

2. Moins de carburant lié à plus d'énergie renouvelable (vent) implique une diminution des coûts.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Analyser des informations pour expliquer comment utiliser des techniques anciennes de consommation d'énergie de manière propre

> « Il naviguera à une vitesse moyenne variant entre 14 et 16 nœuds (entre 25 et 29 km/h). Canopée sera équipé de quatre voiles de 363 m² amenant son tirant d'air maximal à 51 mètres. Les économies de carburant permises par le vent sont variables en fonction des conditions météorologiques rencontrées au cours du voyage. Les économies peuvent être très importantes si les vents sont favorables. Pour optimiser l'utilisation du vent et maîtriser les aléas météorologiques, le futur navire sera équipé d'un outil de routage météorologique [qui] permettra de définir la meilleure route maritime. »
>
> D'après « Insolite. Un cargo hybride voile et moteur amarrera dès 2022 dans le port du Havre », *Paris Normandie*.

1. Les « ailes » de Canopée peuvent être assimilées aux voiles d'un voilier classique. Quels intérêts présentent-elles ?
L'intérêt de ces ailes est d'être reliées à un système d'optimisation de leur orientation en fonction des conditions météorologiques et de définition de la meilleure route maritime à suivre. D'où une économie d'énergie considérable, pour le carburant et la manipulation humaine.

2. En quoi le système hybride de Canopée est-il moins polluant qu'un cargo de la marine marchande classique ?
L'utilisation des ailes/voiles limite la consommation de carburant, contrairement à un cargo classique de la marine marchande. De plus, il combine pour ses moteurs deux carburants, le diesel et le gaz naturel, ce dernier étant moins polluant que le premier. D'où la moindre pollution du système hybride de Canopée.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

16. Coupole du Reichstag à Berlin

Compétence principalement travaillée : Analyser des choix énergétiques dans un cas particulier

Correction :

1. Énergie thermique absorbée → Aquifère (réservoir d'eau) → Énergie thermique utile

2. Cet ensemble constitue un mix énergétique, car il utilise l'énergie radiative et thermique du Soleil pour l'éclairage, la production d'électricité (panneaux photovoltaïque), le chauffage et/ou la climatisation (aquifère comme échangeur de chaleur). Cet ensemble serait parfaitement transposable sur d'autres ensembles de bâtiments, publics ou privés. Le problème est le coût initial d'une telle installation, la rentabilité n'étant pas immédiate.

3. Le coût d'une telle installation en 1999 était très important. De plus, la plupart des dispositifs présentés sont expérimentaux et nécessitent un entretien important. Enfin, la coupole du Reichstag est un édifice particulier par son envergure et sa grande verrière, tous les bâtiments n'ont pas la possibilité technique d'installer des dispositifs semblables.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Analyser un exemple de mix énergétique de production et consommation d'énergie propre d'un bâtiment

1. Quelles conversions subit l'énergie lumineuse du Soleil permettant l'autonomie énergétique du Reichstag ?
L'énergie lumineuse du Soleil subit trois types de transformations énergétiques permettant l'autonomie énergétique du Reichstag :

- Énergie lumineuse du Soleil → Miroir → Énergie lumineuse réfléchie vers la salle
- Énergie thermique absorbée du Soleil → Aquifère (réservoir d'eau) → Énergie thermique utile (chauffage ou air froid)
- Énergie lumineuse du Soleil → Cellule photovoltaïque → Énergie électrique

(Chaque terme au centre de la chaîne énergétique doit être écrit dans une « bulle »).

2. Justifier alors le mix énergétique que constitue le fonctionnement du bâtiment du Reichstag.
Cet ensemble constitue un mix énergétique, car il utilise l'énergie radiative et thermique du Soleil pour l'éclairage, le chauffage et/ou la climatisation (aquifère comme échangeur de chaleur), la production d'électricité (panneaux photovoltaïque).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Chapitre 9 : La biodiversité et son évolution

Présentation **2**

Activités **4**

Activité documentaire 1 : La biodiversité sur Terre (p. 172-173) 4

Activité documentaire 2 : Estimer l'abondance d'une population (p. 174) 9

Activité documentaire 3 : Estimer la proportion d'un caractère (p. 175) 12

Activité numérique : Modéliser et estimer la proportion d'un caractère dans une population (LLS.fr/ESTC9actnum) 15

Activité documentaire 4 : Étude de l'évolution génétique des populations par la méthode de Hardy-Weinberg (p. 176-177) 18

Activité documentaire 5 : L'impact des activités humaines sur la biodiversité (p. 178-179) 29

Bilan (p. 181) **33**

Exercices **34**

Zone d'échauffement (p. 182) 34

L'atelier des apprentis (p. 183) 35

Le repaire des initiés (p. 184) 38

Le coin des experts (p. 185-186) 41

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Le chapitre 9 est la première étude de la biodiversité et de son évolution depuis la classe de seconde pour les élèves n'ayant pas suivi l'enseignement de spécialité SVT en 1re. Ce chapitre présente un ensemble d'outils et de méthodes statistiques pour appréhender et mesurer la biodiversité à différents niveaux. Ces outils permettent ensuite de mettre en évidence des processus évolutifs et de proposer une gestion raisonnée de la biodiversité. Évaluer la biodiversité est un enjeu majeur pour comprendre sa dynamique et envisager les impacts associés aux activités humaines.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Les échelles de la biodiversité : depuis la diversité génétique, jusqu'aux différentes espèces et aux écosystèmes composant la biosphère.
- Les forces évolutives à l'œuvre dans le monde vivant : sélection naturelle, dérive génétique, migrations. Les rappels de ces notions sont bienvenus avant d'aborder l'activité 4 de ce chapitre.
- La gestion durable des agrosystèmes.

Ce qui a été enseigné en première :

- En Enseignement scientifique, la biodiversité n'a pas été traitée. Si le temps le permet, des rappels de seconde en début de chapitre seraient bénéfiques aux élèves n'ayant pas suivi l'enseignement de spécialité SVT.
- En spécialité SVT, le thème 3 « Enjeux contemporains de la planète » traite des écosystèmes et de leur gestion. Les écosystèmes sont abordés du point de vue de leur exploitation et des services écosystèmes. En terminale, l'accent est mis sur la gestion raisonnée des écosystèmes dans un objectif de conservation de la biodiversité.

Liens avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Le chapitre 9 ouvre le thème 3 « Une histoire du vivant ». Ce chapitre permet de mettre en place les outils statistiques d'étude de l'évolution de la biodiversité. Ces notions seront notamment utiles pour le chapitre 10.

Pour réviser les mécanismes de l'évolution avant d'aborder ce chapitre, une activité introductive est proposée en version numérique (LLS.fr/ESTC10actnum).

Bibliographie :

- Denis Poinsot, *Statistiques pour statophobes*, 2004, https://perso.univ-rennes1.fr/denis.poinsot/Statistiques_%20pour_statophobes/STATISTIQUES%20POUR%20STATOPHOBES.pdf : petit fascicule de statistique, il présente de façon claire et humoristique l'importance des statistiques en biologie.
  Le chapitre 4 traite notamment de l'intervalle de confiance d'une moyenne : il permet de comprendre la formule utilisée dans le manuel et de bien appréhender ce qu'est un intervalle de confiance.
- C. Fortin et G. Lecointre, *Guide critique de l'évolution*, Belin, 2009 : ouvrage de référence utile pour les moteurs de l'évolution.
- P. Bouchet, « L'insaisissable inventaire des espèces », *Les dossiers de la recherche* n° 28 : p. 48-55, 2007.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

- Jean Ichter et al., « Les inventaires généraux de la biodiversité en France et dans le monde », *All Taxa Biodiversity Inventories*, 2018.

Sitographie :

- MOOC du MNHN sur la biodiversité et l'éducation au développement durable, notamment le chapitre « Pourquoi et comment mesurer la biodiversité » : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1303
- MOOC du MNHN sur l'inventaire des espèces : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=2995
- Vidéos du MNHN sur les méthodes d'échantillonnage d'espèces : http://edu.mnhn.fr/mod/book/view.php?id=5414&chapterid=525
- Exemple historique d'estimation de la biodiversité mondiale à partir d'un échantillon : http://edu.mnhn.fr/mod/page/view.php?id=1446
- Banques de données en ligne de spécimens de musées (approche historique) :
    - https://www.idigbio.org/portal
    - https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_biodiversity_databases

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Modéliser la méthode CMR en salle de classe à l'aide de cotillons qu'on peut marquer (voir protocole plus bas).
- Modéliser le calcul d'un intervalle de confiance en salle de classe à l'aide d'un bac de cotillons dans lequel la proportion du caractère est inconnu. Faire plusieurs mesures pour voir la variabilité du calcul de fréquence et varier la taille d'échantillon (impact sur la précision de l'intervalle de confiance).
- Modéliser la méthode CMR « grandeur nature » pour estimer la population du lycée :
    - lors d'une récréation les élèves « marquent » (bracelet, relevé des noms, etc.) un échantillon d'élèves ;
    - refaire l'échantillonnage à une deuxième récréation et estimer le nombre d'élèves dans le lycée ;
    - discuter des « limites » de la méthode CMR : migrations (élèves qui sortent de l'établissement), échantillon non représentatif (élèves moins visibles car au CDI, en étude, etc.).

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activités

Les activités 1, 2 et 3 présentent différents outils de mesure de la biodiversité : la diversité écosystémique (activité 1), la diversité spécifique (activités 1 et 2) et pour finir, la diversité allélique (activité 3). Puis, l'activité 4 présente un outil d'étude de l'évolution d'une population. Pour finir, l'activité 5 souligne l'importance de ces différentes mesures de la biodiversité dans une optique de conservation. Les activités 3 à 4 présentent des outils statistiques, qui sont contextualisés dans des exemples biologiques. Afin de faciliter la compréhension de ces outils, chacune de ces activités présente un ensemble de documents, une modélisation (réelle et/ou numérique) ainsi qu'un programme en python à exploiter, ce qui permet de différencier le travail en fonction des compétences des élèves.

Activité documentaire 1 : La biodiversité sur Terre (p. 172-173)

L'inventaire de la biodiversité est loin d'être achevé aujourd'hui. Il est extrêmement difficile, voire impossible d'appréhender et de suivre la biodiversité dans son ensemble. Rien que pour la biodiversité spécifique seules 1,4 millions d'espèces ont été identifiées sur un total estimé entre 15 à 100 millions ! Pourtant, l'érosion actuelle de la biodiversité rend urgente son étude. Cette première activité permet aux élèves de découvrir quelques méthodes d'inventaire de la biodiversité. Si cette activité se concentre sur la biodiversité spécifique, il est pertinent de rappeler, à ce stade, l'existence des trois niveaux (spécifique, écosystémique, génétique), vus en classe de 2de.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution », il s'agit ici d'évaluer la biodiversité à une première échelle spéciale : biodiversité mondiale ou dans un écosystème.

Objectifs notionnels :

- Il existe sur Terre un grand nombre d'espèces dont seule une faible proportion est effectivement connue.
- La biodiversité se mesure par des techniques d'échantillonnage (spécimens ou ADN) qui permettent d'estimer le nombre d'espèces (richesse spécifique) dans différents milieux.
- Les composantes de la biodiversité peuvent aussi être décrites par l'abondance (nombre d'individus) d'une population, d'une espèce ou d'un plus grand taxon.

Objectifs méthodologiques :

- Exploiter des données obtenues au cours d'une sortie de terrain ou d'explorations scientifiques (historiques et/ou actuelles) pour estimer la biodiversité (richesse spécifique et/ou abondance relative de chaque taxon).

Durée estimée : 30 minutes si on ne fait que l'analyse des documents, 60 minutes avec la réalisation du graphique ou du TP.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation des documents

Document 1 : Échantillonner la biodiversité spécifique
Il s'agit d'un échantillon de résultats d'une étude par quadrat dans une prairie alpine. Le document permet de présenter une méthode d'échantillonnage, ainsi que les notions de richesse spécifique et d'abondance. On peut faire le lien entre les conditions locales et la diversité spécifique.
Il peut être utile d'expliquer aux élèves que les noms d'espèces sont en latin, et que chaque nom d'espèce commence par une majuscule.

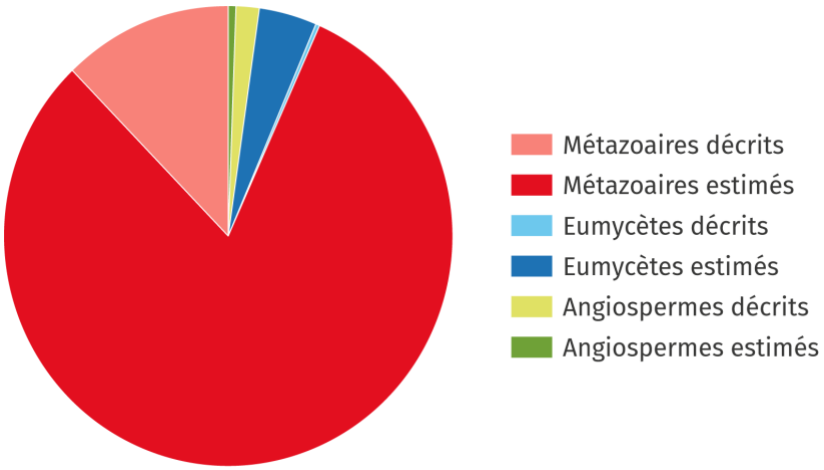
Document 2 : **Aperçu de la biodiversité spécifique mondiale avec quelques groupes**
Ce document présente la biodiversité spécifique connue et estimée de quelques groupes. Les estimations sont basées sur différentes méthodes d'extrapolation des données connues, et restent donc incertaines. Elles évoluent par ailleurs régulièrement.

Document 3 : Des méthodes d'études modernes de la biodiversité : *barcoding* moléculaire et *metabarcoding*
La première partie du document présente la méthode du *barcoding* moléculaire, tandis que la deuxième partie illustre un exemple de son utilisation pour l'étude de la biodiversité marine. Ces méthodes moléculaires sont complémentaires des méthodes d'échantillonnage par quadrats, mais elles ne les remplacent pas.

Réponses attendues aux questions :

1. On observe que la diversité spécifique dans le site Avaro 37 est beaucoup plus faible (7 espèces) que dans le site Avaro 70 (22 espèces). Le site Avaro 70 a une orientation sud, ce qui entraîne une fonte des neiges plus tôt que dans le site Avaro 37. Ainsi le site Avaro 70 dispose de conditions plus favorables pour la végétation alpine, ce qui explique qu'on trouve plus de plantes dans ce site que dans l'autre.

2. Graphique de la part connue et de la part estimée de quelques groupes d'êtres vivants :



On constate qu'une grande part de la biodiversité reste à découvrir et à décrire, dont notamment un grand nombre de métazoaires.

Document sous licence libre Creative Commons

3. On constate que, selon les sites, la composition des échantillons de l'expédition *Tara Oceans* change. Par exemple, en mer Méditerranée, il y a plus de 50 % d'ADN provenant d'espèces de métazoaires, tandis que dans les océans Atlantique et Pacifique on trouve une majorité de dinophytes, de radiolaires et de bactéries. Les espèces varient car les écosystèmes et les conditions écosystémiques sont différents (notamment la quantité de ressources).

4. Les méthodes par échantillonnage (doc. 1) permettent un inventaire exhaustif de la diversité dans un petit échantillon (quadrat ou transect). On peut ensuite extrapoler les résultats pour estimer la diversité sur une surface plus grande (doc. 2). Les méthodes par *metabarcoding* consistent à échantillonner non plus des êtres vivants, mais uniquement des fragments d'ADN et à identifier ces fragments d'ADN dans une banque de données. Cette méthode s'affranchit de la nécessité d'identifier les espèces sur place, et elle permet d'identifier des êtres vivants microscopiques, qu'on ne peut pas forcément cultiver en laboratoire. Cependant, ces méthodes sont coûteuses et donnent peu d'informations sur les espèces identifiées. Les deux méthodes sont donc complémentaires pour étudier la biodiversité.

Protocoles et résultats expérimentaux

1. **Protocole d'échantillonnage par quadrat ou transect (p. 172).**

L'objectif est de réaliser un échantillonnage lors d'une sortie scolaire.

Matériel nécessaire :

- Quadrat : on peut réaliser facilement un quadrat à l'aide d'un cadre en bois sur lequel des fils sont tendus.
- Clé d'identification des végétaux du milieu étudié. La plus précise possible et idéalement avec des photographies. Exemple : http://www.reserves-naturelles.org/ressources/outils/cle-de-determination-des-plantes-du-littoral
- Appareil photo éventuellement.

Protocole :

- Placer le quadrat au sol.
- Relever toutes les espèces présentes dans chacun des carrés du quadrat.

Une version plus simple peut consister à mesurer la diversité spécifique sans identifier les espèces : compter simplement le nombre d'espèces différentes dans le quadrat. On peut par exemple réaliser un échantillonnage à travers un chemin et voir l'impact du piétinement sur la diversité spécifique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. **Déterminer la biodiversité spécifique dans une station de l'océan Indien (p. 173).**

Matériel nécessaire :

- Fichier de séquences :
  - 41 % de Taxon n° 1 (dinophytes) :
    CGCTGGCGGCATGCTTAACACATGCAAGTCGAACGGTAACAGGTCTAGC
    TTGCTAGATGCTGACGAGTGGCGGACGGGTGAGTAACGCGTAGGAATC
    TACCCCGCGGTGGGGGATAACACGAGGAAACTCGTGCTAATACCGCAT
    ACGCTCTACGGAGGAAAATTTTTTTGCCGTGGGATGAGCCTGCGTTAGA
    TTAGCTTGTTGGTGGGGTAATGGCCTACCAAGGCGATGATCTATAGCTG
    TTCTGAGAGGAAGATCAGCCACACTGGGACTGAGACACGGCCCAGACT
    CCTACGGGAGGCAGCAGTGGGGAATCTTGGACAATGGGGGAAACCCTG
    ATCCAGCAATGCCGCGTGTGTGAAGAAGGCCTGCGGGTTGTAAA
  - 21 % de Taxon n° 2 (bactéries) :
    GAGCAGTGCGCTCTCCTGGTGGACGGTTTCGTGGCTGGCCCCACGGCC
    GTGGCGACAGCGCGCCGCAACTTCCCCCGTCAGTGGCTGCACTACCAT
    CGCGCCGGCCACGGCATGATCACCTCCCCCCAGACCCAGCGAGGCTAC
    ACCGCCCTGGTACTCTCCAAGTTCTCGCGATTGCTCGGCTCGTCGGGTA
    TCCACGTCGGCACCATGGGCTTCGGCAAGNTGGAGTC
  - 12 % de Taxon n° 3 (straménopiles) :
    TAGTTGGTGGAGCGATTTGTCTGGTTAATTCCGTTAACGAACGAGACCA
    CAGGGTTTTATTCTTTTCTTTTTATGTAAATAAGAATGTTTTATGTAGATTA
    AACCGACTTTTAATTCTTTAAATTAAAGGAAGTTTGTGGCAATAACAGGTC
- Logiciel de *Basic Local Alignment Search Tool* : https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi
- Ordinateur connecté à internet.

Protocole :

- Aller sur le site https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi qui permet d'aligner des séquences avec une banque de séquences identifiées.
- Sélectionner « Nucleotide BLAST » (Blast de fragment d'ADN).
- Dans le cadre « Enter accession number(s), gi(s), or FASTA sequence(s) », coller ou recopier votre séquence d'ADN à identifier.
- Cliquer sur « BLAST ».
- Noter le nom du taxon identifié à 100 %.
- Recommencer avec les autres séquences.

Remarque : pour les élèves plus rapides on peut proposer de déterminer combien de bases sont nécessaires pour obtenir un résultat fiable.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Ressources complémentaires :

- Les données utilisées pour le document 1 proviennent d'un paquet de statistiques du logiciel R ade4 : https://cran.r-project.org/web/packages/ade4/ade4.pdf
- Exploration des résultats de l'expédition *Tara Oceans* : http://taraoceans.sb-roscoff.fr/EukDiv/
  Pour le document 3, on a choisi d'exploiter l'ADN de surface (SUR) avec une taille de filtre de 0,8-5.
- Modélisation d'échantillonnage, la partie « Model Info » explique les commandes et le fonctionnement du logiciel (en anglais) : http://virtualbiologylab.org/NetWebHTML_FilesJan2016/StreamDiversityModel.html
- Vidéo expliquant le séquençage réalisé par l'expédition *Tara Oceans* : https://oceans.taraexpeditions.org/video-biodiversite-et-sequencage-adn/
- Réalisation virtuelle d'un échantillonnage le long d'un transect (en anglais), avec photographies de quadrats, des espèces et tableau à remplir : http://www.saps.org.uk/secondary/teaching-resources/127-ecology-praticial-distribution-of-species-and-fieldwork-sampling

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 2 : Estimer l'abondance d'une population (p. 174)

Après avoir étudié quelques méthodes d'inventaire de la biodiversité, cette activité se concentre sur une méthode d'estimation de l'abondance d'une population : la méthode de capture-marquage-recapture. Cette méthode, utilisée actuellement, permet non seulement d'estimer une abondance, mais elle est aussi utilisée en épidémiologie (comme l'illustre l'exercice 8 du chapitre) ainsi qu'en dynamique des populations (mortalité, dispersion, etc.). C'est la version la plus simple de la méthode CMR (un seul évènement de recapture) qui est traitée dans le programme.
Cette méthode se base sur le calcul d'une 4e proportionnelle (le « produit en croix »). Les élèves peuvent à ce titre utiliser le livret maths (p. 256) pour des rappels de cours avant de faire l'activité.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution », il s'agit ici d'évaluer la biodiversité à l'aide de l'utilisation d'un modèle statistique.

Objectifs notionnels :

- Il existe plusieurs méthodes permettant d'estimer un effectif à partir d'échantillons.
- La méthode de « capture-marquage-recapture » repose sur des calculs effectués sur un échantillon. Si on suppose que la proportion d'individus marqués est identique dans l'échantillon de recapture et dans la population totale, l'effectif de celle-ci s'obtient par le calcul d'une quatrième proportionnelle.

Objectifs méthodologiques :

- Quantifier l'effectif d'une population ou d'un taxon plus vaste à partir de résultats d'échantillonnage.
- Estimer une abondance par la méthode de capture-marquage-recapture, fondée sur le calcul d'une 4e proportionnelle.

Durée estimée : 30 à 60 minutes selon le niveau de mathématiques des élèves.

Présentation des documents

Document 1 : Principe de la méthode de capture-marquage-recapture (CMR)
Ce document présente sous forme de schémas le principe de la méthode CMR ainsi que les limites de cette méthode. Il peut être complété par la modélisation proposée dans les activités alternatives.

Document 2 : Évolution d'une population australienne d'otaries à fourrure
Il s'agit des résultats d'une étude de la dynamique d'une population d'otaries à fourrure. Les jeunes otaries sont capturées et marquées en enlevant une petite mèche de fourrure. Puis, les événements de recapture se font à distance à la jumelle afin de ne pas perturber davantage la population. Lors de la première mue, la fourrure des jeunes otaries repousse. Il

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

y a ici plusieurs événements de recapture, ce qui permet aux élèves de réaliser plusieurs estimations du nombre de jeunes otaries dans la population.

Réponses attendues aux questions :

1. D'après le doc. 1, $p = \frac{M}{N} = \frac{m}{n}$. On en déduit donc que $N = M \times \frac{n}{m}$

2.

Recapture	1	2	3	4
N	$\frac{1\ 291 \times 1\ 080}{391}$	$\frac{1\ 291 \times 1\ 224}{378}$	$\frac{1\ 291 \times 1\ 107}{363}$	$\frac{1\ 291 \times 1\ 233}{357}$
	3 565,9	4 180,4	3 937	4 458,8

3. L'estimation moyenne de l'abondance des jeunes otaries est de 4 035,5 jeunes otaries. Si on compare les mesures obtenues on a jusqu'à 500 otaries d'écart (mesures 1 et 4). Il est donc important de répéter si possible les échantillonnages afin d'avoir l'estimation la plus précise possible.

4. Entre 1991 et 1998 la population d'otaries à fourrure a augmenté (plus de jeunes).

Protocoles et résultats expérimentaux

1. Protocole de modélisation de la méthode de capture-marquage-recapture en classe

Matériel nécessaire :

- un récipient opaque,
- des cotillons,
- des gommettes ou des marqueurs.

Protocole :

- Remplir le récipient avec un nombre inconnu pour les élèves de cotillons.
- Réaliser une première capture : sortir du sac un échantillon de cotillons.
- Marquer des cotillons au marqueur ou avec des gommettes.
- Remettre les cotillons marqués dans le sac et mélanger.
- Faire une recapture, compter le nombre de cotillons marqués dans la recapture.
- Estimer la taille de la population de cotillons.
- Comparer l'estimation avec la taille connue de la population.
- Répéter l'exercice pour visualiser la variabilité de l'estimation.

Document sous licence libre Creative Commons

2. Protocole de modélisation de la méthode de capture-marquage-recapture dans l'établissement

Matériel nécessaire :

- des élèves,
- un moyen de marquer les élèves (bracelet, étiquette, tampon, etc.).

Protocole :

- Faire une première « capture » d'un échantillon d'élèves du lycée lors d'une première récréation et marquer ces élèves (bracelet, étiquette, tampon, etc.).
- Faire une seconde « capture » d'un échantillon d'élèves du lycée lors d'une seconde récréation.
- En déduire le nombre d'élèves dans le lycée.
- Discuter des facteurs pouvant biaiser l'échantillonnage et trouver les équivalents dans les populations naturelles :
    - élèves qui sortent du lycée → migrations ;
    - élèves moins visibles (au CDI, en perm…) → importance d'échantillonner dans toute la population (espèces chez qui certains membres sont moins visibles).

Variantes :

- Estimer le nombre d'élèves à la cantine, en permanence, au CDI, etc., avec une taille de population plus petite.

Ressources complémentaires :

- Un logiciel permettant de modéliser la méthode de CMR : https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/capture/

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 3 : Estimer la proportion d'un caractère (p. 175)

Cette activité traite de l'estimation de la proportion d'un caractère binaire (existant sous deux formes) à partir du calcul de la fréquence de ce caractère dans un échantillon. Un caractère binaire peut être génétique (ex : gène à deux allèles) ou simplement phénotypique. Le choix a été fait de traiter un caractère phénotypique binaire (couleur des poissons).
Les élèves doivent utiliser la formule de calcul d'un intervalle de confiance à 95 % sans avoir à maîtriser les bases mathématiques expliquant cette formule. Il est cependant important d'être précis quant à la compréhension de l'intervalle de confiance. Un intervalle de confiance encadre une valeur réelle que l'on cherche à estimer à l'aide d'un échantillon. L'intervalle de confiance contient la valeur réelle du caractère dans 95 % des cas. Si pour une raison quelconque l'échantillon est biaisé, alors la valeur réelle du caractère ne sera pas contenue dans l'intervalle de confiance.
Enfin, on peut noter que lorsque la proportion estimée du caractère est trop proche des bornes (0 ou 1), l'intervalle de confiance calculé avec la formule donnée n'est plus fiable, puisqu'il dépasse les bornes 0 ou 1. En effet, la formule de calcul se base sur une distribution suivant la loi normale du caractère dans la population.
Cette activité est associée à une activité numérique différenciée de modélisation d'un caractère binaire dans un tableur et de l'estimation de la proportion du caractère en prenant un échantillon dans ce tirage aléatoire.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution » : on s'intéresse à présent à la diversité au sein d'une population.

Objectifs notionnels :

- À partir d'un seul échantillon, la proportion d'une population portant un caractère donné peut également être estimée à l'aide d'un intervalle de confiance.
- Une telle estimation est toujours assortie d'un niveau de confiance inférieur à 100 % en raison de la fluctuation des échantillons.
- Pour un niveau de confiance donné, l'estimation est d'autant plus précise que la taille de l'échantillon est grande.

Objectif méthodologique :

- À partir d'un échantillon, estimer, en utilisant une formule donnée, la proportion d'individus possédant le caractère dans la population globale par un intervalle de confiance à 95 %.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- À l'aide d'un tableur, simuler des échantillons d'un tirage aléatoire à deux issues (vérifier ou non la présence d'un caractère donné) pour visualiser la fluctuation des fréquences d'apparition du caractère.

Durée estimée : 30 minutes pour les calculs (il suffit simplement d'appliquer la formule) à 60 min avec l'activité numérique différenciée.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation des documents

Document 1 : Deux phénotypes de l'épervier strié (*Paracirrhites arcatus*)
Ce document présente un trait binaire chez l'épervier strié : la couleur des écailles. Lors d'un échantillonnage réalisé le long d'un transect (rappels de l'activité 1), des chercheurs ont compté le nombre de poissons de chaque forme. Selon la couleur du récif, les poissons sont plus ou moins bien camouflés.

Document 2 : Estimer la fréquence d'apparition du caractère « sombre »
À travers un schéma on présente la différence entre proportion « inconnue » du caractère dans la population et fréquence connue du caractère dans l'échantillon réalisé. Le texte explique ce qu'est un intervalle de confiance, ainsi que la formule permettant de le calculer.

Nota : La phrase « Ainsi, *p* a 95 % de chances d'être comprise dans cet intervalle de confiance » doit être lue « Ainsi l'intervalle de confiance a 95 % de chance de contenir *p* ». En effet, *p* est une valeur fixe.

Réponses attendues aux questions :

1. On remarque dans les photographies que selon la couleur et la luminosité des récifs les poissons clairs et sombres sont plus ou moins bien camouflés. Dans la photographie a, on ne voit presque pas l'épervier foncé et, dans la photographie b, c'est l'épervier clair qui est invisible. On peut supposer que la couleur des récifs varie en fonction de la profondeur. Ainsi, à faible profondeur, les récifs sont plutôt sombres et les poissons sombres sont mieux camouflés face aux prédateurs. À l'inverse, dans les eaux profondes, les coraux sont plus clairs et les poissons clairs sont camouflés.
On peut supposer que la différence de couleur des poissons est due à une prédation différentielle des poissons clairs ou sombres selon la couleur des récifs. On peut aussi supposer une évolution locale, à condition qu'il y ait peu d'échanges génétiques entre les poissons des eaux superficielles et les poissons des eaux profondes.

2.

	n	*f*	Borne inférieure de l'intervalle de confiance	Borne supérieure de l'intervalle de confiance
Eaux superficielles	848	0,63	0,6	0,66
Eaux profondes	258	0,08	0,05	0,11

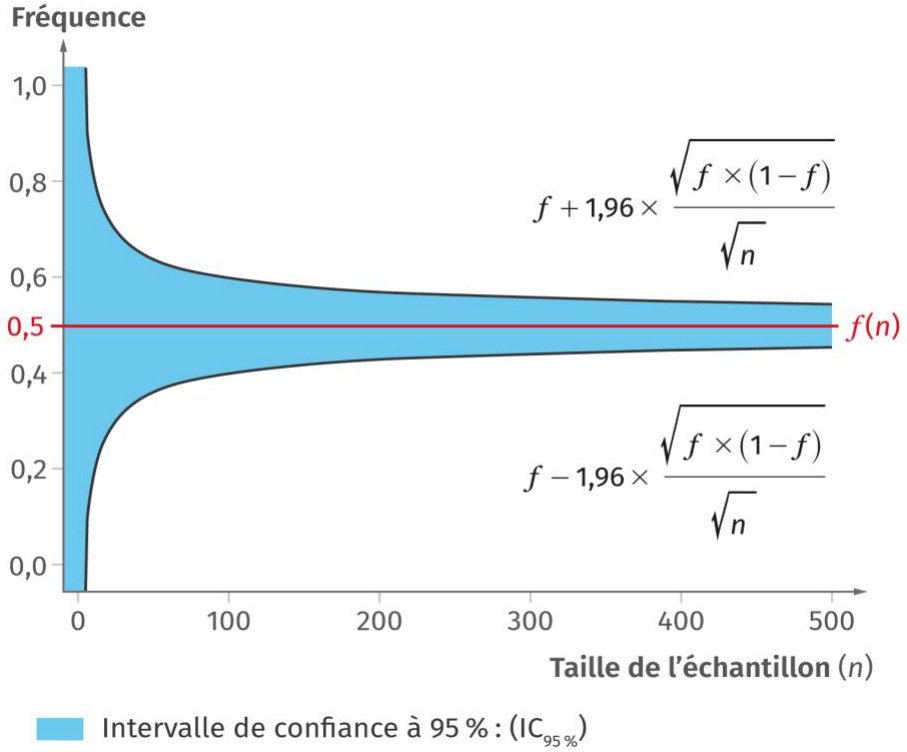
3. L'intervalle de confiance est inversement proportionnel à la racine de la taille de l'échantillon. Ainsi, plus la taille de l'échantillon sera grande plus la valeur de $1,96 \times \frac{\sqrt{f \times (1-f)}}{\sqrt{n}}$ sera petite et donc plus l'intervalle de confiance est réduit.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Cependant, pour des échantillons suffisamment grands, la différence sur l'intervalle de confiance est faible. Par exemple, pour n = 848 on obtient une valeur de f de ± 0,032 alors que pour n = 258 la valeur de f est ± 0,033 donc une différence de 0,001 !

Ressources complémentaires :

- Impact de la taille d'échantillon sur la précision de l'intervalle de confiance :



On peut proposer aux élèves de réaliser ce graphique à l'aide de leur calculatrice graphique ou d'un tableur. On observe qu'à partir de n = 200 l'impact de n sur l'intervalle de confiance est très faible.

- Visualisation de l'intervalle de confiance pour différentes précision (% de confiance) et pour différentes tailles d'échantillon : http://experiences.math.cnrs.fr/Intervalles-de-confiance.html

Document sous licence libre Creative Commons

Activité numérique : Modéliser et estimer la proportion d'un caractère dans une population (LLS.fr/ESTC9actnum)

Cette activité différenciée complète l'activité 3 en proposant aux élèves de simuler dans un tableur l'apparition d'un caractère binaire dans une population, puis d'estimer la proportion du caractère étudié à partir d'un échantillon de leur population simulée.
Il est aussi possible de faire cette activité avec un programme Python disponible en ressource numérique.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution » : on s'intéresse à présent à la diversité au sein d'une population.

Objectifs notionnels :

- À partir d'un seul échantillon, la proportion d'une population portant un caractère donné peut également être estimée à l'aide d'un intervalle de confiance.
- Pour un niveau de confiance donné, l'estimation est d'autant plus précise que la taille de l'échantillon est grande.

Objectifs méthodologiques :

- À l'aide d'un tableur, simuler des échantillons d'un tirage aléatoire à deux issues (vérifier ou non la présence d'un caractère donné) pour visualiser la fluctuation des fréquences d'apparition du caractère.

Présentation des documents

Cette activité est associée à une fiche technique pour le tableur utilisé (Calc ou Excel) que les élèves doivent utiliser pour répondre aux questions. Ces fiches techniques sont à retrouver sur : https://disciplines.ac-toulouse.fr/svt/fiches-techniques

Groupe 1 : Utiliser un fichier tableur pour modéliser et estimer la proportion d'un caractère

Document 1 : Modélisation de l'apparition d'un caractère à l'aide d'un tableur
Ce document est un fichier tableur prérempli dans lequel la formule permettant de modéliser le caractère de la couleur des écailles est entrée en case B2. La modélisation se base directement sur l'activité 3, afin de faciliter la compréhension par les élèves du groupe 1.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. Utiliser le tableur pour modéliser la présence du caractère « sombre » dans une population de 100 poissons.
En sélectionnant les cases A2 et B2, les élèves appliquent la formule sur 100 cases. Il suffit d'étendre la formule vers le bas pendant que le compteur « poisson » incrémente le nombre jusqu'à 100.

2. Décrire l'apparition du caractère dans la population modélisée.
On observe que des poissons clairs et sombres apparaissent au hasard. En recommençant ou en comparant avec un voisin, les résultats sont différents.

3. Utiliser le tableur pour déterminer la proportion du caractère « sombre » à partir d'un échantillon de vingt poissons, avec un intervalle de confiance de 95 %.
Les élèves choisissent un groupe de 20 poissons dans lequel ils comptent le nombre de poissons sombres. Le nombre total de poissons est 20. Ils complètent le tableau et le logiciel appliquent la formule préremplie pour calculer la fréquence dans l'échantillon et l'intervalle de confiance.

Remarques :
- On peut demander aux élèves de comparer la proportion du caractère et la fréquence calculée dans l'échantillon (=SI(B2=="Sombre";1;0)), puis de faire la somme et de diviser par 100.
- On peut demander aux élèves de déterminer l'impact de la taille d'échantillon sur la précision de l'intervalle de confiance en prenant différents échantillons.

Groupe 2 : Utiliser une fiche technique de tableur pour modéliser et estimer la proportion d'un caractère

Réponses attendues aux questions :

1. À l'aide de la fiche technique tableur, construire un tableau permettant de modéliser la présence (notée 1) ou l'absence (notée 0) d'un caractère sur cinq cents individus.
Utiliser la fonction « remplir des cellules » sur une plage (A2:A502) de 500 cellules avec une distribution de Bernoulli et une valeur de *p* entre 0,3 et 0,7.

2. Déterminer la proportion de la présence du caractère à partir d'un échantillon d'individus avec un intervalle de confiance de 95 %.
Sélectionner un échantillon et calculer la fréquence des « 1 » dans cet échantillon. Puis, appliquer la formule de l'intervalle de confiance pour calculer l'intervalle de confiance.

3. Déterminer l'influence de la taille de l'échantillon sur l'intervalle de confiance à 95 %.
Recommencer la question 2 avec des échantillons de différentes tailles.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Groupe 3 : Construire un fichier tableur pour modéliser et estimer la proportion d'un caractère

Réponses attendues aux questions :

1. Modéliser dans un tableur la présence du caractère « sombre » dans une population de cent poissons.
Pour modéliser la présence du caractère sombre il faut créer une fonction qui va remplir aléatoirement les cases avec sombre ou clair :
SI(ALEA.ENTRE.BORNES(0;1)=1;"sombre";"clair"). Puis, il faut appliquer cette formule dans 100 cases.

2. Déterminer, à l'aide de la fiche technique tableur, la proportion du caractère « sombre » à partir d'un échantillon de poissons avec un intervalle de confiance de 95 %.
Prendre un échantillon dans les poissons modélisés et calculer la fréquence du caractère sombre. Pour calculer l'intervalle de confiance, il faut appliquer la formule donnée dans l'activité 3.

3. Comparer la proportion estimée avec la proportion réelle du caractère dans la population simulée.
On compare la proportion estimée et la proportion réelle de l'échantillon modélisé.

4. Déterminer l'influence de la taille d'échantillon sur l'intervalle de confiance à 95 %.
On recommence la question 2 mais pour différentes tailles d'échantillons.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 4 : Étude de l'évolution génétique des populations par la méthode de Hardy-Weinberg (p. 176-177)

Pour cette activité, les élèves sont amenés à découvrir le modèle de Hardy-Weinberg, puis à démontrer l'équilibre de Hardy-Weinberg avant d'utiliser ce modèle pour mettre en évidence l'action de forces évolutives sur une population de loups.
Préalablement à l'activité, le doc. 2 et le rappel vidéo sur l'hérédité mendélienne permettent aux élèves de revoir l'hérédité des allèles lors de la reproduction sexuée.
Le modèle de Hardy-Weinberg décrit la structure génétique d'un gène biallélique dans une population idéale. En recherche, ce modèle est généralement utilisé pour vérifier l'équilibre de différents *locus*. Parmi les hypothèses de la population idéale, c'est la panmixie qui est la plus importante vis-à-vis de la structure génétique de la population. Toute forme de croisement non aléatoire (choix du partenaire, consanguinité) va entraîner une déviation à l'équilibre de Hardy-Weinberg. Les autres forces évolutives (sélection naturelle, dérive génétique, mutation) peuvent avoir un effet, mais il sera généralement faible.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution », notamment la structure génétique et l'évolution des populations.

Objectifs notionnels :

- Au cours de l'évolution biologique, la composition génétique des populations d'une espèce change de génération en génération.
- Le modèle mathématique de Hardy-Weinberg utilise la théorie des probabilités pour décrire le phénomène aléatoire de transmission des allèles dans une population.
- En assimilant les probabilités à des fréquences pour des effectifs de grande taille (loi des grands nombres), le modèle prédit que la structure génétique d'une population de grand effectif est stable d'une génération à l'autre sous certaines conditions (absence de migration, de mutation et de sélection).
- Cette stabilité théorique est connue sous le nom d'équilibre de Hardy-Weinberg.
- Les écarts entre les fréquences observées sur une population naturelle et les résultats du modèle s'expliquent notamment par les effets de forces évolutives (mutation, sélection, dérive, etc.).

Objectifs méthodologiques :

- Pour la transmission de deux allèles dans le cadre du modèle de Hardy-Weinberg, établir les relations entre les probabilités des génotypes d'une génération et celles de la génération précédente.
- Produire une démonstration mathématique pour prouver ou constater que les probabilités des génotypes sont constantes à partir de la seconde génération (modèle de Hardy-Weinberg).
- Analyser une situation d'évolution biologique expliquant un écart par rapport au modèle de Hardy-Weinberg.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Produire un calcul sur tableur ou un programme Python pour prouver ou constater que les probabilités des génotypes sont constantes à partir de la seconde génération (modèle de Hardy-Weinberg).
- Utiliser des logiciels de simulation basés sur ce modèle mathématique.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Génétique de la population de loups de Yellowstone

Ce premier document présente les bases génétiques de la couleur du pelage chez le loup. Il introduit les deux allèles **A** et **a**, les calculs de fréquence des allèles (*p* et *q*) ainsi que les fréquences des génotypes des loups dans la population.

Chez le loup, la couleur du pelage est un trait complexe. Cependant, dans la population du parc de Yellowstone, les pelages gris et noirs présentent une ségrégation mendélienne. La couleur noire, dominante, correspond à une délétion de 3 paires de bases au *locus* K de l'allèle *CBD103* (version appelée allèle **A** dans l'exercice) qui supprime l'activité du gène *Agouti*.

Document 2 : Transmission mendélienne des allèles

Ce document rappelle la transmission mendélienne des allèles. Il peut être mis en relation avec la vidéo de rappels. Il permet aux élèves de revoir les notions et les représentations des gènes et des allèles.

Document 3 : Modèle de Hardy-Weinberg

Ce document est constitué de 3 parties :

- un schéma qui rappelle la génétique du pelage dans la population de Yellowstone, en lien avec le doc. 1 ;
- un texte qui présente le modèle de Hardy-Weinberg ainsi que ses hypothèses ;
- un tableau de croisement (échiquier de Punnett) qui permet de prédire le patrimoine génétique résultant d'un croisement entre deux parents. Dans ce tableau on applique la loi des grands nombres qui permet d'assimiler la fréquence d'un allèle à la probabilité de transmettre cet allèle à la génération suivante.

Document 4 : Calcul de l'équilibre

À partir du tableau de croisement du doc. 3, on peut déduire la fréquence de l'allèle A à la génération 1. On constate qu'à partir de deux générations, la fréquence des génotypes est stable. Par contre f_1(AA) peut être différent de f_0(AA).

Pour rendre l'exemple plus abordable, on peut proposer aux élèves de partir d'un échiquier de Punnett concret avant de passer à la généralisation avec *p* et *q*.

Document 5 : Écarts au modèle de Hardy-Weinberg

En lien avec le doc. 3, ce document précise qu'un écart entre les génotypes attendus suivant le modèle d'Hardy-Weinberg et les génotypes réels observés s'explique par un non-respect d'au moins une des hypothèses de la population idéale.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 6 : Valeur sélective des loups de Yellowstone

Lors de l'étude des documents, les élèves sont amenés à constater un écart entre les génotypes attendus et observés (questions 3 et 5). Cet écart s'explique par des forces de sélection : on constate que la valeur sélective des différents génotypes n'est pas équivalente. Les valeurs sélectives peuvent être utilisées dans un des logiciels de modélisation pour constater leur effet sur l'évolution de la fréquence de A (et donc des génotypes).

Réponses attendues aux questions :

1. Fréquence de A :

$$f(\mathrm{A}) = \frac{\text{nombre (A//A)} + \frac{1}{2} \times \text{nombre de (A//a)}}{\text{population totale}}$$

$$f(\mathrm{A}) = \frac{31 + \frac{1}{2} \times 321}{765}$$

$$f(\mathrm{A}) = 0,25$$

Fréquence de a :

$$f(\mathrm{a}) = \frac{\text{nombre (a//a)} + \frac{1}{2} \times \text{nombre de (A//a)}}{\text{population totale}}$$

$$f(\mathrm{a}) = \frac{413 + \frac{1}{2} \times 321}{765}$$

$$f(\mathrm{a}) = 0,75$$

$$f(\mathrm{a}) = 1 - f(\mathrm{A})$$

Remarques :

- On peut aussi proposer le calcul en nombre d'allèles. Dans ce cas :
  $$f(\mathrm{A}) = \frac{2 \times f(\mathrm{A//A}) + f(\mathrm{A//a})}{2 \times \text{population totale}}$$
- Les élèves peuvent aussi utiliser le doc. 4 pour calculer :
  $$f(\mathrm{A}) = f(\mathrm{A//A}) + \frac{1}{2} f(\mathrm{A//a})$$

2. On peut préciser aux élèves qu'il s'agit de prédire les fréquences des génotypes à la génération 2.

En admettant que la population est assez grande et que la reproduction se fait au hasard, la probabilité de transmettre un allèle A est sa fréquence *p*.

À la génération 1, la fréquence de A est $f_1(\mathrm{A}) = p$ (cf. doc. 4).

À la génération 1, la fréquence de a est $f_1(\mathrm{a}) = 1 - p = q$.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

On peut réaliser le tableau de croisement suivant pour la génération 2 :

		Gamète femelle	
		A (p)	a (q)
Gamète mâle	A (p)	A//A (p^2)	A//a (pq)
	a (q)	A//a (pq)	a//a (q^2)

On peut donc prédire que les génotypes à la génération suivante seront :
$f_2(\mathrm{A//A}) = p^2$
$f_2(\mathrm{A//a}) = 2 \times pq$
$f_2(\mathrm{a//a}) = q^2$

3. D'après la question **1** on sait que p = 0,25 et q = 0,75.

Génotype	A//A	A//a	a//a
Fréquence attendues d'après HW	p^2 = 0,0625	$2pq$ = 0,375	q^2 = 0,5625

4. D'après les calculs (question **3**) et le doc. 3, on constate que :

Génération	***f*(A)**	***f*(a)**	***f*(A//A)**	***f*(A//a)**	***f*(a//a)**
0	p	q	inconnu	inconnu	inconnu
1	p	q	p^2	$2pq$	q^2
2	p	q	p^2	$2pq$	q^2

On constate qu'à partir de la génération 2, les fréquences des allèles (p et q), ainsi que les fréquences des génotypes (p^2, $2pq$, q^2), restent stables.
Si à la génération N on a :

- $f_{\mathrm{N}}(\mathrm{A//A}) = p^2$;
- $f_{\mathrm{N}}(\mathrm{A//a}) = 2pq$;
- $f_{\mathrm{N}}(\mathrm{a//a}) = q^2$.

On peut en déduire la fréquence des génotypes à la génération N+1 :
$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A})$ = (fréquence de A à la génération)^2

$$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A}) = \left(f_{\mathrm{N}}(\mathrm{A//A}) + \frac{1}{2} \times f_{\mathrm{N}}(\mathrm{A//a})\right)^2$$

$$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A}) = (p^2 + \frac{1}{2} \times 2 \times pq)^2$$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A}) = (p^2 + p \times (1-p))^2$
$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A}) = (p^2 + p - p^2)^2$
$f_{\mathrm{N+1}}(\mathrm{A//A}) = p^2 = f_{\mathrm{N}}(\mathrm{A//A})$

Le raisonnement est le même pour la fréquence de a//a. Ainsi, au cours des générations, la fréquence des génotypes ne change pas : on peut parler d'équilibre.

5. En comparant les fréquences attendues et les fréquences observées, on constate que les fréquences observées ne suivent pas l'équilibre de Hardy-Weinberg, avec notamment un excès de loups hétérozygotes A//a et de loups homozygotes a//a, et un déficit de loups homozygotes A//A. Un écart à l'équilibre de Hardy-Weinberg peut s'expliquer par un effet des forces évolutives (sélection, dérive, mutations, migrations). Dans le doc. 6, on peut voir que les génotypes ne sont pas équivalents vis-à-vis de la valeur sélective des loups. En effet, les loups A//a et a//a ont une valeur sélective largement plus forte que les loups A//A. Donc les loups porteurs de l'allèle a vont mieux se reproduire et vont plus transmettre leur allèle à la génération suivante. On peut supposer que l'allèle a subi une sélection naturelle positive et augmente de fréquence dans la population.

Ressources complémentaires :

- https://cartwrig.ht/apps/redlynx/
  Logiciel en ligne (en anglais) d'étude de l'évolution d'un *locus* existant sous deux formes (A1 et A2). Ce logiciel très complet permet d'agir sur plusieurs paramètres de la population idéale et voir l'impact de différentes forces évolutives sur la stabilité de la fréquence de A1 :
  - taille de la population ;
  - sélection naturelle ;
  - mutation ;
  - migration (on peut préciser la fréquence de A1 dans la population des migrants).
- https://www.pedagogie.ac-nice.fr//svt/productions/evolution-allelique/ : moins complet que le précédent (juste la valeur sélective), mais en français.
- http://evolution.gs.washington.edu/popgen/ : logiciel de simulation de l'évolution d'un *locus* biallélique, en anglais. Installable, il est codé en Java, ce qui nécessite d'avoir Java installé sur les ordinateurs. Il permet les mêmes simulations que le premier logiciel, mais s'affranchit d'une connexion internet.
- https://evobir.shinyapps.io/wf_model/ : un autre logiciel de simulation (en anglais). Il permet les mêmes tests que le premier logiciel, mais en pouvant ajouter la fréquence attendue de A dans le modèle.
- Tableau des résultats de croisements observés et attendus selon panmixie dans le parc de Yellowstone.

Croisement	Gris × Gris	Noir × Noir	Gris × Noir
Nombre de croisements observés	54	41	166
Nombre de croisements attendus si panmixie	71	58	132

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Les chercheurs ont observé un appariement préférentiel des loups, ce qui explique la différence entre les fréquences attendues et les fréquences observées des génotypes.

Protocoles et résultats expérimentaux

Déterminer l'effet des forces évolutives et tester l'équilibre de Hardy-Weinberg, à l'aide d'un programme Python

Matériel nécessaire :

- ordinateur avec Python installé, ou accès au Laboratoire Python en ligne : https://www.lelivrescolaire.fr/console-python
- programme Python :
    - tester l'équilibre de HW (fonction HW),
    - déterminer l'effet des forces évolutives (fonctions HWsel et HWder),
    - constater l'équilibre de HW (fonction HWgen).

Protocole :

- Lire le programme Python et identifier à quoi correspondent les variables.
    - Aide possible : compléter un tableau pour identifier les variables.
- À l'aide de l'utilisation des fonctions :
    - tester si la population de loups est à l'équilibre de Hardy-Weinberg ;
    - trouver un population qui ne soit pas à l'équilibre ;
    - déterminer l'évolution des fréquences des génotypes au cours de 10 générations dans une populations idéale de HW.

Fonctions Python à utiliser :

3 fonctions Python sont proposées :

- tester l'équilibre de HW : à partir des effectifs connus pour les génotypes A1A1, A1A2 et A2A2, le programme calcule les fréquences observées et attendues et effectue un test de chi2 pour déterminer si les fréquences sont statistiquement différentes ;
- déterminer l'effet des forces évolutives ;
- constater l'équilibre de HW : à partir des effectifs connus pour les génotypes AA, Aa et aa, le programme calcule les fréquences attendues pour un nombre de génération déterminé par l'élève. Cela permet de constater qu'au bout de 2 générations on atteint l'équilibre de HW.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Programme Python pour constater l'équilibre de HW à partir des effectifs connus pour les génotypes AA, Aa et aa. Le programme calcule les fréquences attendues pour un nombre de générations (G) déterminé par l'élève. Cela permet de constater qu'au bout de 2 générations on atteint l'équilibre de HW, avec un affichage de courbe :

```
import matplotlib.pyplot as plt
def HWgen(P1,P2,P3,G) :
 N=P1+P2+P3
 D=P1/N
 H=P2/N
 R=P3/N
 print("La fréquence du génotype AA à la génération 0 est ", round(D,4))
 print("La fréquence du génotype Aa à la génération 0 est ", round(H,4))
 print("La fréquence du génotype aa à la génération 0 est ", round(R,4))
 x = [0]
 AA = [round(D,4)]
 Aa = [round(H,4)]
 aa = [round(R,4)]
 for i in range(0,G+1) :
        p = D+1/2*H
        q = R+1/2*H
        D = p**2
        H=2*p*q
        R=q**2
        x.append(i)
        AA.append(round(D,4))
        Aa.append(round(H,4))
        aa.append(round(R,4))
        print("La fréquence du génotype AA à la génération "+str(i)+" est ", round(D,4))
        print("La fréquence du génotype Aa à la génération "+str(i)+" est ", round(H,4))
        print("La fréquence du génotype aa à la génération "+str(i)+" est ", round(R,4))
 plt.xlabel('génération')
 plt.ylabel('fréquence des génotypes')
 plt.xlim(-0.1, G)
 plt.xticks(range(G+1))
 plt.ylim(0, 1)
 plt.plot(x, AA, "--", label = "fréquence de AA")
 plt.plot(x, Aa, ":", label = "fréquence de Aa")
 plt.plot(x, aa, "-.", label = "fréquence de aa")
 plt.legend()
 grid=true
 plt.show()
```

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Programme Python pour tester l'effet de la sélection naturelle à partir des effectifs connus pour les génotypes AA, Aa et aa. Le programme calcule les fréquences attendues sous HW pour un nombre de générations (G) déterminé par l'élève et les fréquences d'après une force de sélection naturelle (S), avec un affichage de courbe :

```
import matplotlib.pyplot as plt
def HWsel(P1,P2,P3):
	S = float(input("Donner la valeur de la force de la selection naturelle sur l'allele A
(entre 0 et 1) : "))
	while S>1 :
	print("La valeur de la sélection doit etre entre 0 et 1")
	S = float(input("Donner la valeur de la force de la selection naturelle sur l'allele A
(entre 0 et 1) : "))

	G = int(input("Choisi un nombre de generations : "))
	while G<1 :
	print("Il faut un nombre positif de generations !")
	G = int(input("Choisi un nombre de generations : "))

	N=P1+P2+P3 # taille de la population
	# P1 = nombre d'individus AA
	# P2 = nombre d'individus Aa
	# P3 = nombre d'individus aa

	D=P1/float(N)# fréquence de AA
	H=P2/float(N) # fréquence de Aa
	R=P3/float(N) # fréquence de aa

	p = (P1+0.5*P2)/float(N)
	q = 1 - p

	# Les valeurs de p et q suivant HW
	pHW=p
	qHW=q

	x = [0] # Nombre de générations
	AAHW = [round(D,4)] # fréquence des génotypes AA au cours des générations
suivant HW
	AaHW = [round(H,4)] # fréquence des génotypes Aa au cours des générations
suivant HW
	aaHW = [round(R,4)] # fréquence des génotypes aa au cours des générations
suivant HW

	AA = [round(D,4)] # fréquence des génotypes AA au cours des générations suivant
la sélection naturelle
	Aa = [round(H,4)] # fréquence des génotypes Aa au cours des générations suivant la
sélection naturelle
```

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

```
aa = [round(R,4)] # fréquence des génotypes aa au cours des générations suivant la sélection naturelle

for i in range(0,G+1) :
pHW = D+0.5*H
qHW = R+0.5*H
D = pHW**2
H=2*pHW*qHW
R=qHW**2
x.append(i)
AAHW.append(round(D,4))
AaHW.append(round(H,4))
aaHW.append(round(R,4))

if p<0.9: # À chaque génération on augmente la fréquence de l'allèle A de la valeur de la sélection naturelle jusqu'à ce que ça atteigne 1
p = p + S
AA.append(round(p**2,4))
Aa.append(round(2*p*(1-p),4))
aa.append(round((1-p)**2,4))
else: # Si p a atteint 1 on incrémente plus
AA.append(1)
Aa.append(0)
aa.append(0)

plt.xlabel('generation')
plt.ylabel('frequence des genotypes')
plt.xlim(-0.1, G)
plt.xticks(range(G+1))
plt.ylim(0, 1)
plt.plot(x, AAHW, label = "frequence de AA suivant HW")
plt.plot(x, AaHW, label = "frequence de Aa suivant HW")
plt.plot(x, aaHW, label = "frequence de aa suivant HW")
plt.plot(x, AA, label = "frequence de AA dans un cas de selection positive sur l'allele A")
plt.plot(x, Aa, label = "frequence de Aa dans un cas de selection positive sur l'allele A")
plt.plot(x, aa, label = "frequence de aa dans un cas de selection positive sur l'allele A")
plt.legend()
plt.show()
```

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Programme Python pour tester l'effet de la dérive génétique à partir des effectifs connus pour les génotypes AA, Aa et aa. Le programme calcule les fréquences attendues pour un nombre de générations (G) déterminé par l'élève, avec affichage de courbe :

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy
def HWder(P1,P2,P3):
	G = 0
	while G<1 :
	G = int(input("Choisi un nombre de generations : "))

	N=P1+P2+P3 # taille de la population
	# P1 = nombre d'individus AA
	# P2 = nombre d'individus Aa
	# P3 = nombre d'individus aa

	D=P1/float(N)# fréquence de AA
	H=P2/float(N) # fréquence de Aa
	R=P3/float(N) # fréquence de aa

	p = (P1+0.5*P2)/float(N)
	q = 1 - p

	# Les valeurs de p et q suivant HW
	pHW=p
	qHW=q

	x = [0] # Nombre de générations
	AAHW = [round(D,4)] # fréquence des génotypes AA au cours des générations
suivant HW
	AaHW = [round(H,4)] # fréquence des génotypes Aa au cours des générations
suivant HW
	aaHW = [round(R,4)] # fréquence des génotypes aa au cours des générations
suivant HW

	AA = [round(D,4)] # fréquence des génotypes AA au cours des générations suivant
la dérive génétique
	Aa = [round(H,4)] # fréquence des génotypes Aa au cours des générations suivant la
dérive génétique
	aa = [round(R,4)] # fréquence des génotypes aa au cours des générations suivant la
dérive génétique

	for i in range(0,G+1) :
	pHW = D+0.5*H
	qHW = R+0.5*H
	D = pHW**2
```

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

```
H=2*pHW*qHW
R=qHW**2
x.append(i)
AAHW.append(round(D,4))
AaHW.append(round(H,4))
aaHW.append(round(R,4))

# pour modéliser la dérive, on modélise le tirage de tous les génotypes de la population suivant une loi binomiale
# les individus 2 ont deux allèles A, les individus 1 ont un allèle A et les individus 0 ont deux allèles a
ind = numpy.random.binomial(2,p,N)
p = sum(ind)/float(2*N) #Nouvelle fréquence de l'allèle p
AA.append(round(sum(ind==2)/float(N),4))
Aa.append(round(sum(ind==1)/float(N),4))
aa.append(round(sum(ind==0)/float(N),4))

plt.xlabel('generation')
plt.ylabel('frequence des genotypes')
plt.xlim(-0.1, G)
plt.xticks(range(G+1))
plt.ylim(0, 1)
plt.plot(x, AAHW, "--", label = "frequence de AA suivant HW")
plt.plot(x, AaHW, "--", label = "frequence de Aa suivant HW")
plt.plot(x, aaHW, "--", label = "frequence de aa suivant HW")
plt.plot(x, AA, label = "frequence de AA en cas de derive")
plt.plot(x, Aa, label = "frequence de Aa en cas de derive")
plt.plot(x, aa, label = "frequence de aa en cas de derive")
plt.legend()
plt.show()
```

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activité documentaire 5 : L'impact des activités humaines sur la biodiversité (p. 178-179)

Les activités humaines sont le principal facteur d'érosion de la biodiversité. L'objectif de cette activité est de travailler sur l'impact des activités humaines, et notamment de la fragmentation du paysage, à l'aide de l'exemple du lynx ibérique. Contrairement au reste du chapitre, cette activité présente peu de notions mathématiques, les élèves ayant déjà travaillé sur la dérive génétique.

Lien avec le programme :

- Point 3.1 du B.O « La biodiversité et son évolution » et plus précisément la partie « comprendre les conséquences des actions humaines ».

Objectifs notionnels :

- Les activités humaines (pollution, destruction des écosystèmes, combustions et leurs impacts climatiques, surexploitation d'espèces, etc.) ont des conséquences sur la biodiversité et ses composantes (dont la variation d'abondance) et conduisent à l'extinction d'espèces.
- La fragmentation d'une population en plusieurs échantillons de plus faibles effectifs entraîne par dérive génétique un appauvrissement de la diversité génétique d'une population.
- La connaissance et la gestion d'un écosystème permettent d'y préserver la biodiversité.

Objectifs méthodologiques :

- Utiliser un modèle géométrique simple (quadrillage) pour calculer l'impact d'une fragmentation sur la surface disponible pour une espèce.
- À partir d'un logiciel de simulation, montrer l'impact d'un faible effectif de population sur la dérive génétique et l'évolution rapide des fréquences alléliques.
- Analyser des documents pour comprendre les mesures de protection de populations à faibles effectifs.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème.
- Envisager des solutions pour un environnement proche.

Durée estimée : 45 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Le lynx ibérique : une espèce menacée

Ce premier document d'appel permet de présenter l'espèce étudiée, ainsi que son milieu de vie. Il est associé à une carte interactive en ligne. Cette carte est en espagnol mais facilement compréhensive, on peut notamment afficher :

- l'aire de distribution du lynx ibérique en 1960, 2002 ou 2016 ;

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- les aires de réintroduction et les événements d'information du programme *Iberlince* (en lien avec le doc. 3) ;
- les accidents qu'on subit les lynx (et obtenir un graphique, en lien avec le doc. 2).

Document 2 : **Déclin du lynx ibérique**
Ce document, en lien avec le doc. 4, fournit plusieurs pistes de réflexion sur les origines de la diminution de l'abondance du lynx ibérique. Il permet aussi d'expliquer certaines des mesures de conservations du doc. 3.

Document 3 : Projet *Iberlince* en Andalousie
Ce texte présente le projet *Iberlince* de conservation du lynx ibérique et ses nombreux volets d'actions.

Document 4 : Évolution de la population de lynx ibérique
Ce graphique montre l'évolution de l'abondance du lynx ibérique depuis les années 1900. Il faudrait être vigilant sur la lecture des ordonnées pour les élèves n'ayant pas l'habitude d'axes tronqués.

Document 5 : Fragmentation des écosystèmes
Sous forme d'un modèle géométrique simple ce document permet d'illustrer les impacts de la fragmentation de l'écosystème sur les populations (espace réduit, perte de connectivité).

Document 6 : Diversité génétique du lynx ibérique et dérive génétique
Ce document présente la dérive génétique (vue en classe de seconde), ainsi que l'effet de la taille de la population sur l'intensité de la dérive. Il est à mettre en relation avec le doc. 5. Le doc. 6 peut être exploité avec le logiciel de modélisation proposé dans le bloc TP.

Réponses attendues aux questions :

1. De 1900 à 2002, la population de lynx a fortement diminuée (d'une estimation à 100 000 on passe à moins de 100 individus). Depuis 2002, la population de lynx augmente sans pour autant retrouver des valeurs similaires aux années 1900 : en 2017, il y a un peu plus de 400 lynx ibériques.
On peut expliquer la diminution de 1900 à 2002 par l'impact des activités humaines en 1980 : les principales causes de la mortalité du lynx sont les activités humaines (piégeage et accidents). De plus, l'activité humaine a entraîné une forte diminution des lapins de garenne, alors qu'il s'agit de la source principale de nourriture du lynx. Donc, les lynx qui n'ont plus assez à manger vont moins se reproduire et/ou mourir.
Depuis 2002, l'Union européenne finance un programme de conservation du lynx, ce qui explique l'augmentation de la population de lynx entre 2002 et 2017.

2. Suite à la fragmentation du paysage on détermine :
Surface totale = $3 \times 3 + 2 \times 2 + 2 \times 2 + 3 \times 2 = 23$ m^2. La surface a diminué.
Périphérie = $3 \times 4 + 2 \times 4 + 2 \times 4 + 2 \times 2 + 3 \times 2 = 38$ m. La périphérie a augmenté.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Remarques :

- La distinction entre fragmentation et perte d'habitat peut être étudiée dans l'exercice 15.
- On peut remplacer cette question par un travail sur la carte numérique et décrire l'effet de l'urbanisation sur la répartition du lynx.

3. Dans le document 6, on constate que la population de Doñana a moins d'allèles que celle de Sierra Morena, et que les populations espagnoles ont une diversité génétique faible (moins d'allèles) par rapport au lynx boréal. D'après ce document, la dérive génétique peut entraîner la disparition d'allèles dans les petites populations. Or, à Doñana, il y a seulement 76 lynx par rapport aux 285 lynx de Sierra Morena : on peut donc supposer qu'au cours des générations, la dérive a été plus forte à Doñana, ce qui a entraîné des pertes d'allèles. De plus, ces populations espagnoles sont petites, alors que lynx boréal n'est pas en voie de disparition. Donc, les populations de lynx ibérique ont une diversité génétique plus faible que le lynx boréal, parce que dans ces populations la dérive génétique est forte.

4. Suite à la dérive génétique, le lynx ibérique a une diversité génétique faible, ce qui peut diminuer son potentiel adaptatif face à des environnements changeants. Cela peut poser problème pour la conservation du lynx.

5. Les mesures de conservation prises dans le projet *Iberlince* ont pour objectif de limiter les impacts des activités humaines.

Activité humaine	**Impacts**	**Mesure de conservations**
Chasse du lynx	Mortalité du lynx	- Mise en place d'aires protégées - Information des chasseurs - Patrouilles de garde forestier - Restauration de l'écosystème
Chasse du lapin de garenne	Manque de nourriture	- Restauration de l'écosystème - Réintroduction de lapins
Route	Mortalité par accidents	Amélioration de la sécurité des routes
Urbanisation et routes	Fragmentation de l'écosystème du lynx en petites populations, ce qui entraîne une perte de diversité génétique par dérive génétique	- Échanges d'individus entre populations - Reproduction en captivité - Création d'une banque génétique

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Protocoles et résultats expérimentaux

Modéliser la dérive génétique dans une petite population à l'aide d'un logiciel

Matériel nécessaire :

- Logiciel dérive génétique en ligne : https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/derive-genetique/.

Protocole :

- Réaliser 10 fois la simulation pour un effectif initial de 1 000 individus.
- Réaliser 10 fois la simulation pour un effectif initial de 100 individus.
- Comparer l'évolution des fréquences alléliques dans les deux cas.

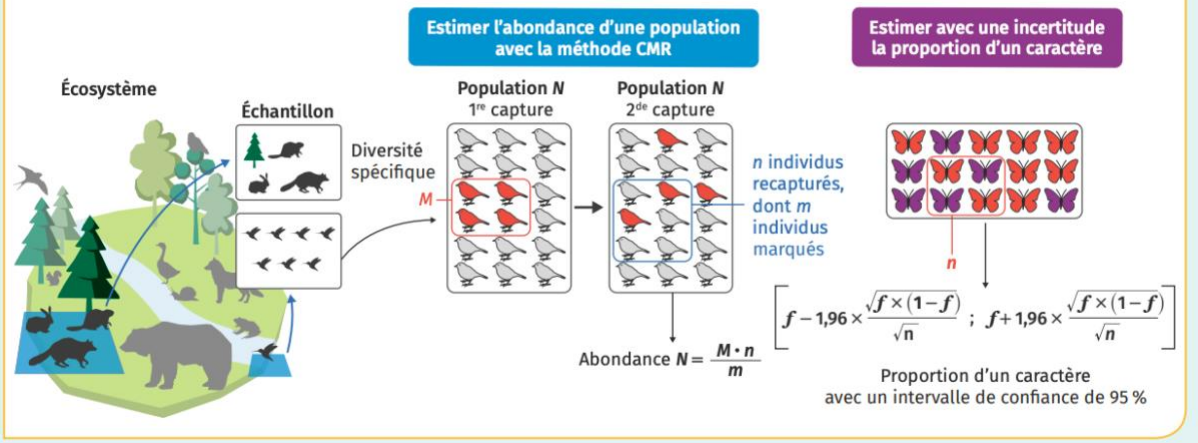
Ressources complémentaires :

- Logiciel de modélisation de la dérive génétique : https://cartwrig.ht/apps/genie/.
  Ce logiciel est très visuel, chaque couleur représente un allèle dans la population. On peut ajouter des barrières en cliquant sur les cases, cela permet de modéliser et de visualiser l'impact de la fragmentation du paysage directement sans passer par différentes simulations.
- Autre modélisation de la dérive qui permet de comprendre l'importance du hasard : http://www.pedagogie.ac-nice.fr/wp-content/uploads/sites/5/productions/derive-tirage-boules/

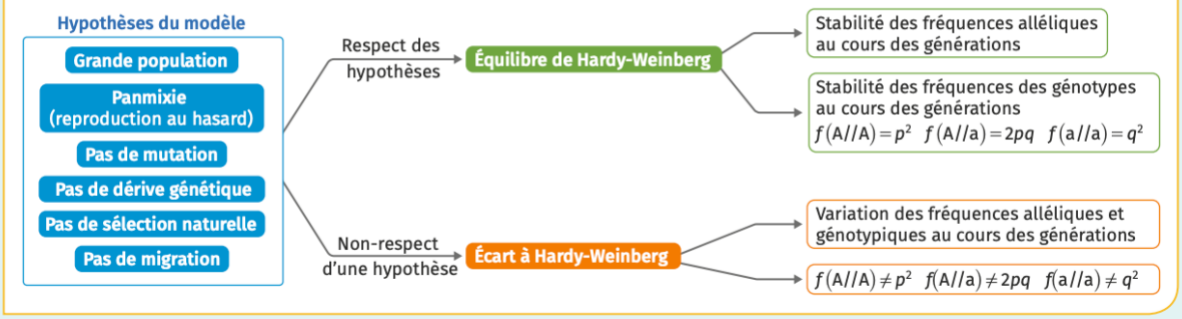
Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 181)

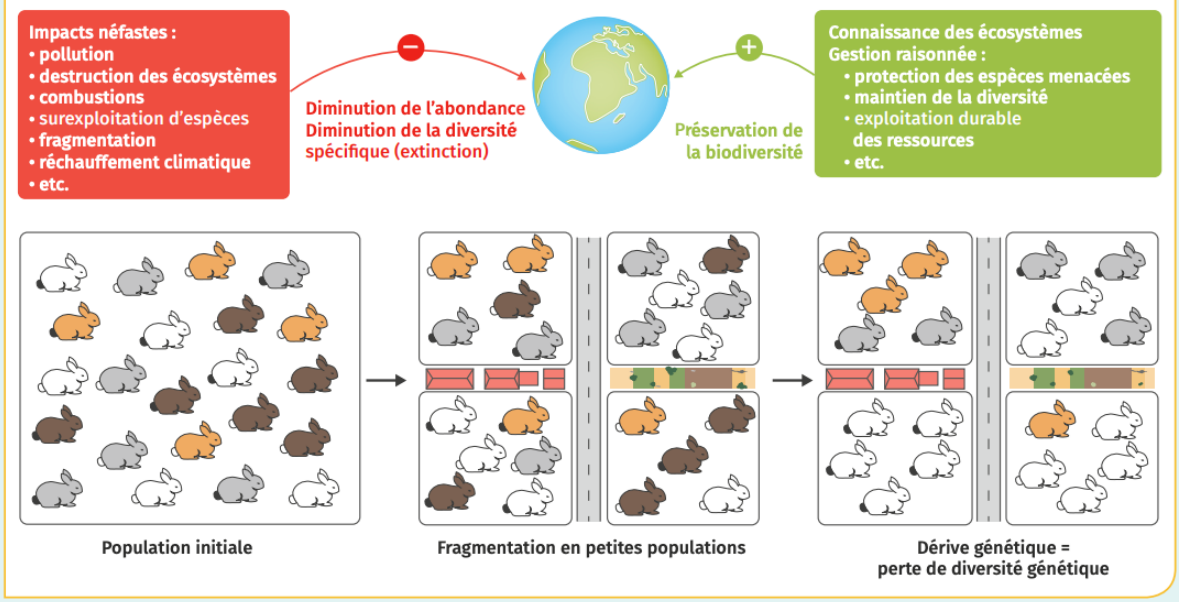
Les différentes mesures de la biodiversité



Modèle de Hardy-Weinberg et structure génétique des populations



Impact des activités humaines sur la biodiversité



Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 182)

1. L'abondance d'une espèce est :

b. le nombre d'individus dans une espèce.

2. Dans la population, à l'équilibre de Hardy-Weinberg, décrite dans le tableau ci-dessous, la fréquence *p* de l'allèle A est :

c. $0,4 = 0,16 + \frac{1}{2} \times 0,48$

3. Soit une fréquence de *f* = 0,63 éperviers striés sombres à moins de 5 m de profondeur, avec un intervalle de confiance $IC_{95\,\%}$ = [0,60 ; 0,66]. Cela signifie que :

b. la probabilité que l'intervalle [0,60 ; 0,66] contienne la vraie proportion d'épervier striés sombres à moins de 5 m de profondeur est de 95 %.

4. D'après ces mesures de CMR, la population est estimée à :

b. 300 individus = $\frac{100 \times 120}{40}$

5. La fragmentation d'une population en plusieurs petites populations peut entraîner :

c. une diminution de la diversité génétique par dérive génétique.

6. Pour un gène possédant deux allèles A et a, avec *f*(A) = 0,6, à l'équilibre de Hardy-Weinberg, on aura :

a. 48 % d'hétérozygotes Aa = 2 × 0,6 × 0,4 × 100.

7. Justifier cette phrase du chercheur Michael Bruford, au sujet des petites populations de tigres des régions forestières de l'Inde, désormais pauvres en diversité génétique : « Le nombre de tigres, à lui seul, n'est pas un facteur suffisant pour assurer la survie de l'espèce. Il faudrait protéger l'ensemble des réserves forestières, car nombre d'entre elles ont maintenant des populations qui ont leurs propres combinaisons de gènes uniques, qui pourraient être utiles pour les programmes de sélection futurs. »

Suite à la fragmentation de la population initiale de tigres en petites populations, ces tigres ont perdu par hasard des allèles par dérive génétique. Mais comme cette perte d'allèles se fait au hasard, les allèles perdus ne sont pas les mêmes dans les différentes populations. Ainsi, chaque petite population a une faible diversité génétique, mais l'ensemble des petites populations a pu conserver une grande part de la diversité génétique initiale. Il est donc plus important de protéger l'ensemble des petites populations de tigres et pas juste les plus grosses de ces populations, car certaines petites populations peuvent avoir des allèles qui peuvent être importants pour le potentiel adaptatif de l'espèce au changements futurs.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 183)

8. La méthode de capture-marquage-recapture en épidémiologie

Compétence principalement travaillée : Quantifier l'effectif d'une population, d'un taxon ou la fréquence d'un caractère, à partir de résultats d'échantillonnages

Correction :

1. Le principe de la méthode CMR consiste à « capturer » une première fois un échantillon d'individus d'une population, les « marquer » et les « recapturer » une seconde fois.
Ici, la population étudiée est la population de personnes souffrant de diabète de type 2. La première capture est le diagnostic par un médecin généraliste, les personnes « capturées » sont « marquées » sur une liste. La seconde « capture » est l'admission à l'hôpital. On a donc tous les éléments nécessaires pour utiliser la méthode de CMR ici.

2. $N = \frac{M \times n}{m} = \frac{1469 \times 454}{151} = 4416,7$
Avec la méthode CMR on estime qu'il y a environ 4 417 personnes souffrant de diabète de type 2 à Liverpool.

Suggestion de question supplémentaire :

3. **Quel est l'intérêt d'utiliser le CMR en épidémiologie ?**
Le diabète de type 2 est une maladie qui n'est pas toujours détectée très tôt. D'après ces estimations, il y a environ 3 000 personnes qui souffrent potentiellement de diabète de type 2 sans le savoir. On constate d'ailleurs que 300 personnes ont été admises à l'hôpital pour des complications liées au diabète sans savoir qu'elles étaient diabétiques. L'estimation du nombre de personnes pouvant souffrir du diabète de type 2 peut permettre à la ville de Liverpool d'adapter sa stratégie de prévention publique.

Remarque : On peut profiter de cet exercice pour évoquer l'importance des méthodes d'évaluation statistiques de nombre de malades, ou la proportion de personnes atteintes dans la population dans le cadre de l'épidémie de COVID-19. Par exemple la détection sérologique de la proportion de personnes immunisées contre le SARS-CoV-2 après une période de confinement peut permettre d'estimer avec un intervalle de confiance la proportion de la population déjà immunisée contre le SARS-CoV-2. Cela peut permettre d'estimer la taille d'un second pic épidémique.

Sources/Bibliographie :

- Ismail et al., *International journal of Epidemiology*, 2000.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

9. Consanguinité dans une population de cerfs

Compétence principalement travaillée : Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème et comprendre les mesures de protection des populations à faible effectif

Correction :

1. La population de cerfs de Hasselbusch est plus petite, et a une diversité génétique plus faible que la population de cerfs de Segeberg.

2. Dans la petite population de Hasselbusch, la dérive génétique est forte, ce qui a entraîné des pertes d'allèles et de la consanguinité. En conséquence, on observe des malformations dans la population de Hasselbusch.

Suggestion de question supplémentaire :

3. **Proposer une solution pour rétablir la diversité génétique des cerfs de Hasselbusch.**
On peut proposer :
- la mise en place d'un corridor au-dessus de la route pour rétablir la connectivité entre les deux populations ;
- des transferts de cerfs (mais plus compliqué à maintenir dans le temps).

Sources/Bibliographie :
- Zachos et al., « *Genetic analysis of an isolated red deer (Cervus elaphus) population showing signs of inbreeding depression* », *European Journal of Wildlife Research* (2007).

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Montrer l'impact d'un faible effectif de population sur la dérive génétique

1. **Proposer une explication aux différences observées entre les deux populations.**
On observe que la population de cerfs de Hasselbusch est plus petite, et a une diversité génétique plus faible que la population de cerfs de Segeberg. Cette petite population provient d'un événement de colonisation depuis la grande population de Segeberg. Comme la population de Hasselbusch est petite, il y a une forte dérive génétique qui a entraîné des pertes d'allèles, ce qui explique pourquoi la diversité génétique est plus faible à Hasselbusch qu'à Segeberg. De plus, la faible diversité génétique, ainsi que la consanguinité à Hasselbusch, sont responsables des malformations observées.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

10. Gérer l'écosystème marin

Compétence principalement travaillée : Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème et comprendre les mesures de protection des populations à faible effectif

Correction :

1. De 1850 à la fin des années 1950, la quantité de morues pêchées est stable. Puis, de 1958 à 1968, la quantité augmente brusquement (× 4). De 1968 à 1980, elle diminue fortement et retrouve environ la même valeur qu'avant 1950, et ce jusqu'à 1989. À partir de 1989, la quantité de morues péchées s'effondre brusquement à quasiment 0.

2. En absence de régulation, on voit que la pêche augmente fortement à la fin des années 1950, suite à quoi la quantité de poissons pêchés diminue fortement, car le stock de morues est épuisé. Les quotas de pêche permettent d'assurer le maintien d'un stock suffisant de poissons pour garantir la stabilité de l'espèce.

3. Sur le graphique on peut voir que, malgré la mise en place des TAC, la quantité de morues pêchées s'effondre juste avant la fermeture des zones de pêches. Donc, la population de morue du Canada n'a pas réussi à se maintenir : soit la mise en place des TAC a été trop tardive et il n'y avait déjà plus assez de morues pour assurer la stabilité de l'espèce, soit le TAC était trop élevé par rapport à la quantité de morues restantes et la population a continué à s'effondrer.

Sources/Bibliographie :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Effondrement_de_la_p%C3%AAcherie_de_morue_de_Terre-Neuve

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le repaire des initiés (p. 184)

11. Prévalence de la drépanoctyose

Compétence principalement travaillée : Analyser une situation d'évolution biologique expliquant un écart au modèle de Hardy-Weinberg

Correction :

1. Dans le doc. 1, on peut voir que, dans le cas de la drépanocytose, les hématies sont déformées et peuvent boucher les vaisseau sanguins.

2. $$f_S = \frac{\text{nombre (S//S)} + \frac{1}{2} \times \text{nombre (A//S)}}{\text{population totale}} = \frac{96 + \frac{1}{2} \times 838}{3\ 182 + 838 + 96} = 0,125$$

3.

Génotype	Nombre d'enfants attendus
A//A	$f(A//A) \times 350\ 000 = (1 - 0,125)^2 \times 350\ 000 = 267\ 968,75$
A//S	$f(A//S) \times 350\ 000 = 2 \times 0,125 \times (1 - 0,125) \times 350\ 000 = 76\ 562,5$
S//S	$f(S//S) \times 350\ 000 = 0,125^2 \times 350\ 000 = 5\ 468,75$

4. On observe un écart entre le nombre d'enfants attendus et le nombre d'enfants observés, avec notamment un excès d'enfants homozygotes *S//S* et hétérozygotes *A//S*.

5. En République Démocratique du Congo et dans d'autres régions, la présence du paludisme crée une pression de sélection positive sur la fréquence de l'allèle *S*. En effet les personnes *A//S* seront plus résistantes au paludisme et se reproduiront plus, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence de l'allèle *S* au cours des générations. Cela explique l'écart entre le nombre de naissances attendues et le nombre de naissances observées : on n'est pas à l'équilibre de Hardy-Weinberg, car il y a une action des forces évolutives sur l'allèle *S*.

Suggestion de questions supplémentaires :

Questions pour une version apprenti :

1. **Calculer la fréquence de l'allèle S en République Démocratique du Congo.**

$$f_S = \frac{\text{nombre (S//S)} + \frac{1}{2} \times \text{nombre (A//S)}}{\text{population totale}} = \frac{96 + \frac{1}{2} \times 838}{3\ 182 + 838 + 96} = 0,125$$

2. **Utiliser l'équilibre de Hardy-Weinberg pour prédire le nombre d'enfants malades (*S//S*) dans les 350 000 naissances par an.**

D'après l'équilibre de HW :

$$\text{Nombre d'enfants malades (S//S)} = 350\ 000 \times 0,125^2 = 5\ 468,75$$

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

3. Comparer le nombre d'enfants réellement malades à la prédiction calculée précédemment.
D'après l'équilibre de Hardy-Weinberg on attend que 5 469 enfants malades alors qu'en réalité il y en a beaucoup plus (2500 enfants malades de plus environ).

Sources/Bibliographie :

- Frédéric B. Piel, et al., « *Observed and expected frequencies of structural hemoglobin variants in newborn screening surveys in Africa and the Middle East: deviations from Hardy-Weinberg equilibrium* », *Genetics in Medicine* (2016).
- Léon Tshilolo et al., « *Neonatal screening for sickle cell anaemia in the Democratic Republic of the Congo : Experience from a pioneer project on 31 204 newborns* », *Journal of clinical pathology* (2009).

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Analyser une situation d'évolution biologique expliquant un écart à Hardy-Weinberg

Ressource supplémentaire : Répartition des génotypes des naissances au Bahreïn en 1992 et en 2012.

Génotype	*A//A*	*A//S*	*S//S*
Nombre d'individus en 1992	8 954	1 157	217
Fréquence en 1992	0,867	0,112	0,021
Nombre d'individus en 2012	33 512	5 247	228
Fréquence en 2012	0,860	0,134	0,006

1. Calculer la fréquence de l'allèle *S* au Bahreïn en 1992 et en 2012.

$$f_{1992}(\mathrm{S}) = 0,021 + \frac{1}{2} \times 0,112 = 0,077$$

$$f_{2012}(\mathrm{S}) = 0,006 + \frac{1}{2} \times 0,134 = 0,076$$

2. Déterminer la fréquence attendue d'enfants malades (S//S) en 1992 et en 2012.

$$f_{1992}(\text{enfants S//S}) = 0,077^2 = 0,006$$

$$f_{2012}(\text{enfants S//S}) = 0,076^2 = 0,006$$

3. Comparer les fréquences attendues et observées d'enfants malades en 1992 et 2012. Proposer une explication aux différences observées.
En 1996, on observe beaucoup plus d'enfants malades (3,5 fois plus) que ce que l'on attend selon l'équilibre de Hardy-Weinberg. Par contre, en 2012, on constate que les fréquences attendues et observées sont les mêmes : en 2012, la population du Bahreïn est à l'équilibre de Hardy-Weinberg.
En 1996, la population du Bahreïn n'est pas à l'équilibre de Hardy-Weinberg, donc une des hypothèses du modèle de Hardy-Weinberg n'est pas respectée. D'après le texte, on peut lire que les mariages au sein de familles étendues étaient fréquents en 1996. Ainsi, l'hypothèse des appariements au hasard (panmixie) n'est pas respectée, ce qui explique l'écart à l'équilibre de Hardy-Weinberg.
Comme cela posait un problème de santé publique (3 fois plus d'enfants malades que ce qui devrait être observé), le Bahreïn a mis en place une politique d'information et de dépistage

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

des personnes porteuses de l'allèle *S*. Suite à cette politique, le nombre de mariage entre personnes porteuses de l'allèle *S* a diminué et la population est maintenant à l'équilibre de Hardy-Weinberg.

12. Effet de la déforestation sur les colibris

Compétence principalement travaillée : Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème et comprendre les mesures de protection de populations à faible effectif

Correction :

1. En milieu fragmenté, la richesse spécifique est de 4 espèces, en milieu non fragmenté, la richesse spécifique est de 12 espèces.

2. La fragmentation du paysage entraîne une diminution de la richesse spécifique (moins d'espèces), ainsi qu'une diminution de l'abondance (moins de colibris).

Sources/Bibliographie :

- Adam S. Hadley, « *Forest fragmentation and loss reduce richness, availability, and specialization in tropical hummingbird communities* », *Biotropica* (2017),

Ressources pour aller plus loin :

- Tableau de mesures d'abondance :

Surface de forêt sur le site (en ha)	Pourcentage de surface contenant de la forêt dans un périmètre de 1 000 m autour du site	Abondance totale des colibris	Nombre d'espèces de colibris
3,16	7,80	32	6
2,76	8,71	16	4
1 359	74,47	37	7
110	70,30	20	6
883	48,21	40	8
365	65,89	30	8
246	52,48	16	6
95	42,09	26	6
4,86	18,46	26	6
3,18	19,14	15	4
15,97	45,58	29	8
8,8	21,67	29	7
1,69	24	14	4
1 036	62,87	48	12

Document sous licence libre Creative Commons

Le coin des experts (p. 185-186)

13. Résistance du moustique aux insecticides au Maroc

Compétence principalement travaillée : Quantifier l'effectif d'une population, d'un taxon ou la fréquence d'un caractère à partir de résultats d'échantillonnages

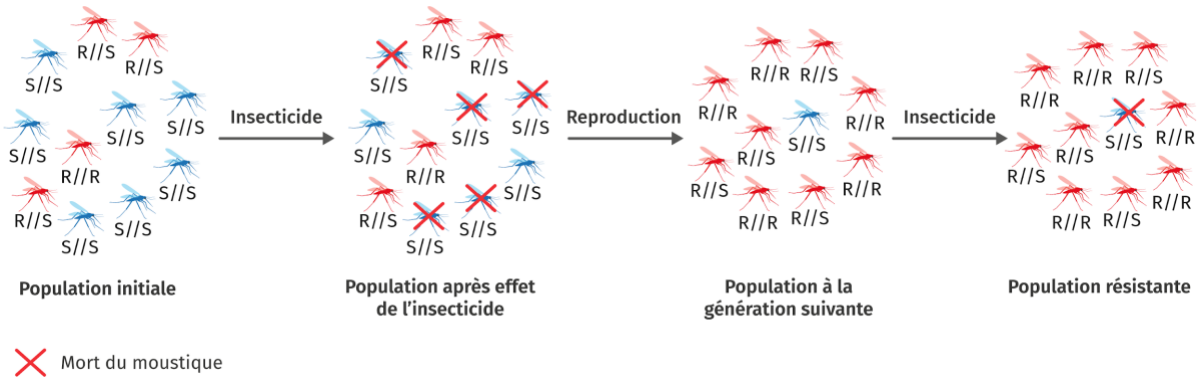
Correction :

1.

	f(*R*)	$IC_{95\%}$
Population rurale	0,088	[0,02 ; 0,15]
Population urbaine	0,24	[0,15 ; 0,33]

La fréquence de l'allèle *R* est plus élevée en milieu urbain et les deux intervalles de confiance ne se recoupent pas.

2. Schéma de l'évolution d'une population de moustique soumise à la pression de sélection d'un insecticide.



On peut voir que la fréquence de l'allèle *R* augmente au cours des générations, ce qui amplifie la résistance de la population.

Document sous licence libre Creative Commons

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Estimer la proportion d'individus possédant un caractère dans la population

Ressource complémentaire :

	Génotype	*S//S*	*R//S*	*R//R*
En milieu rural	Fréquence observée	0,84	0,15	0,01
	Fréquence attendue sous Hardy-Weinberg	0,83	0,16	0,01
En milieu urbain	Fréquence observée	0,53	0,46	0,01
	Fréquence attendue sous Hardy-Weinberg			

1. Comparer la résistances des moustiques des différents génotypes à l'insecticide. Que peut-on supposer pour l'allèle *R* ?
Les moustiques *S//S* sont peu résistants à l'insecticide. À l'inverse les moustiques *R//S* et *R//R* restent vivants à 100 % suite à l'exposition à l'insecticide : ils sont résistants. On peut supposer que l'allèle *R* permet aux moustiques de résister à l'insecticide.

2. Calculer la fréquence de l'allèle *R* en milieu urbain, puis compléter le tableau du doc. 2.

$$f(R)_{\text{milieu urbain}} = f(R//R) + \frac{1}{2} \times f(R//S) = 0,24$$

Génotype	*S//S*	*R//S*	*R//R*
Fréquence attendue sous Hardy-Weinberg	$(1-0,24)^2 = 0,58$	$2 \times 0,24 \times (1-0,24) =$	$0,24^2 = 0,06$

3. Comparer les fréquences attendues et observées des génotypes en milieu urbain et rural. Proposer une explication.
En milieu rural les fréquences attendues et observées sont semblables donc la population rurale de moustiques est à l'équilibre de Hardy-Weinberg.
À l'inverse en milieu urbain il y a beaucoup plus d'individus *R//R* que ce qui est attendu sous Hardy-Weinberg. La population urbaine est soumise à une sélection naturelle sur l'allèle *R*, dont la fréquence augmente au cours des générations. Comme il y a sélection naturelle les hypothèses du modèle de Hardy-Weinberg ne sont pas respectées ce qui explique l'écart entre les fréquences attendues et observées.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

14. Impacts de la fragmentation sur la biodiversité

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données pour estimer la biodiversité

Correction :

1.

	Diversité spécifique	Abondance	Indice de simpson
Milieu continu	12	importante	0,43
Milieu fragmenté	14	moyenne	0,65

En milieu fragmenté, on trouve plus d'espèces différentes, mais avec une abondance moins importante qu'en milieu continu. L'indice de Simpson est donc plus important en milieu fragmenté, puisqu'il donne une indication de l'hétérogénéité de l'écosystème.

2. De manière générale, on voit souvent la fragmentation comme négative pour la biodiversité, car elle entraîne une perte d'espace. De plus, les populations sont fragmentées en petits groupes qui sont davantage soumis à la dérive. Cependant, on voit ici que, selon les mesures de la biodiversité, la fragmentation n'est pas toujours négative : dans l'herbier fragmenté, on trouve plus d'espèces différentes et le milieu fragmenté est plus hétérogène. À l'inverse, dans l'herbier continu, il y a moins d'espèces, mais celles-ci sont plus abondantes, avec notamment une très forte abondance de *Assiminea californica*.
Selon le paramètre relatif à la biodiversité mesuré, la fragmentation peut avoir un effet positif ou négatif sur la biodiversité.

Sources/Bibliographie :

- D. Healey et al. , « *Seagrass bed patchiness: effects on epifaunal communities in San Diego Bay, USA* », *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* (2004).

Ressources pour aller plus loin :

- Différents indices de diversité :
  - https://en.wikipedia.org/wiki/Diversity_index
  - https://fr.wikipedia.org/wiki/Indicateur_de_biodiversit%C3%A9
- Quelques indicateurs de biodiversité : http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/tous

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données pour estimer la biodiversité

1. Calculer l'indice de Simpson pour le milieu continu et le milieu fragmenté.

$$\text{Indice de Simpson}_{(\text{continu})} = 1 - \sum_{i=1}^{\text{Total especes}} p_i^2$$

Indice de Simpson$_{(\text{continu})}$ = 1 - [*f*(*Assiminea californica*)$_2$ + *f*(*Paracerceis sculpta*)$_2$

+ *f*(*Gammaridae spp.*)$_2$ + *f*(*Musculista senhousia*)$_2$ + *f*(*Mitrella carnita*)$_2$

+ *f*(*Acteocina inculta*)$_2$ + *f*(*Macoma spp.*)$_2$ + *f*(*Lophopanopeus bellus*)$_2$]

Indice de Simpson$_{(\text{continu})}$ =

$$1-\left(\left(\frac{1\ 100}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{227}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{85}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{20}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{39}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{15}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{3}{1\ 496}\right)^2+\left(\frac{7}{1\ 496}\right)^2\right)$$

Indice de Simpson$_{(\text{continu})}$ = 0,43.

De la même façon, Indice de Simpson$_{\text{fragmenté}}$ = 0,65.

2. Compléter le tableau ci-dessous, puis comparer les différentes mesures de la biodiversité en milieu continu et en milieu fragmenté.

	Diversité spécifique	Abondance	Indice de Simpson
Milieu continu			
Milieu fragmenté			

	Diversité spécifique	Abondance	Indice de Simpson
Milieu continu	12	importante	0,43
Milieu fragmenté	14	moyenne	0,65

En milieu fragmenté, on trouve plus d'espèces différentes mais avec une abondance moins importante qu'en milieu continu. En milieu fragmenté, l'indice de Simpson est plus important qu'en milieu continu.

3. Proposer une explication à la différence de l'indice de Simpson entre le milieu fragmenté et le milieu continu.

En regardant le calcul de l'indice de Simpson, plus la fréquence des espèces est importante, plus l'indice de Simpson diminue. En milieu continu, il y a une espèce très abondante : *f*(*Assiminea californica*) = 0,54, donc l'indice de Simpson diminue vite. En revanche, en milieu fragmenté, on trouve plus d'espèces différentes, mais avec une abondance moins importante qu'en milieu continu. Par exemple, l'espèce la plus abondante, *Assiminea californica*, a une

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

fréquence de 0,26. Donc, en milieu fragmenté, l'indice de Simpson diminue moins vite. Le milieu fragmenté est plus hétérogène que le milieu continu : il y a moins d'individus mais une plus grande diversité d'espèces.

15. Étude expérimentale sur la fragmentation

Compétence principalement travaillée : Exploiter des données pour estimer la biodiversité

Correction :

1. Dans leur expérience, Robinson et Quinn comparent deux sites bleus de 32 m^2 avec 8 sites verts de 8 m^2.
Au total, il y a donc :

- $2 \times 32 = 64$ m^2 pour les grands sites bleus ;
- $8 \times 8 = 64$ m^2 pour les petits sites verts.

Ainsi, la surface est la même : il n'y a donc pas de perte d'habitat entre les sites bleus et les sites verts. En revanche, les sites verts sont plus petits et correspondent donc à un état de milieu fragmenté.

2. Dans le document 1, dans chaque site vert, la diversité spécifique est plus faible que dans un site bleu. En revanche, dans le document 2, on constate que la diversité spécifique totale des sites verts est plus grande que la diversité spécifique totale des sites bleus. Même si chaque site fragmenté a moins d'espèces, en cumulant les espèces sur tous les sites fragmentés, on a plus d'espèces que dans les sites non fragmentés.

3. Dans les petites populations, la fréquence de l'allèle varie fortement : elle passe à 0 % (dans 3 cas) ou à 100 % (dans 2 cas) en moins de 100 générations. Cela signifie que, dans les petites populations, des allèles disparaissent par hasard : c'est l'effet de la dérive. À l'inverse, dans les grandes populations, la fréquence de l'allèle varie moins, la dérive est moins forte, aucun allèle ne disparaît.

4. À une échelle de temps courte, la fragmentation sans perte d'habitat permet une augmentation de la diversité spécifique. On peut faire plusieurs hypothèses : hétérogénéité plus importante qui favorise certaines espèces, espèces préférant les bordures de l'écosystèmes, diminution de la prédation, etc. Mais sur le long terme, la perte de connectivité entre les populations fragmentées entraîne une diminution de la diversité génétique des populations par dérive. Cela peut faire chuter le potentiel adaptatif des espèces qui seront plus fragiles à des changements de milieu.

Sources/Bibliographie :

- G. R. Robinson, « *Extinction, turnover and species diversity in an experimentally fragmented California annual grassland* », *Œcologia* (1988).

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Chapitre 13 : De l'informatique à l'intelligence artificielle

Présentation 2

Activités 3

Activité documentaire 1 : L'informatique, des débuts de l'écriture à nos jours (p. 234-235) 3

Activité documentaire 2 : La taille d'un fichier (p. 236) 6

Activité documentaire 3 : Un algorithme fondamental de l'intelligence artificielle : le perceptron (p. 237) 8

Activité documentaire 4 : L'intelligence artificielle, des applications concrètes (p. 238) 10

Activité documentaire 5 : L'intelligence artificielle dans la vie de tous les jours (p. 239) 12

Activité de groupe 6 : Informatique et éthique (p. 240-241) 13

Groupe 1 : Puisqu'il faut choisir 13

Groupe 2 : Le *big data*, les dangers, les complications 14

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite 14

Bilan (p. 243) 16

Exercices 17

Zone d'échauffement (p. 244) 17

L'atelier des apprentis (p. 245) 19

Le repaire des initiés (p. 246-247) 24

Le coin des experts (p. 248) 29

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation

L'émergence de l'intelligence artificielle (IA) a permis d'accomplir des tâches et de résoudre des problèmes jusqu'ici traités par les humains : la reconnaissance faciale, les *chatbots*, ou la conduite automatique en sont des exemples. Mais ces progrès techniques soulèvent la question de l'usage qui doit en être fait.

Ce qui a été enseigné en seconde :

- Les rudiments de programmation en python ont été donnés.
- La notion de vecteur est développée dans le cadre du plan. Cette notion, généralisée à des espaces de dimensions arbitrairement grandes, permet de modéliser les données sur lesquelles les intelligences artificielles apprennent.
- Les grandes dates de l'informatiques ont été abordées en SNT.

Ce qui a été enseigné en première :

- En spécialité Mathématiques, la notion de probabilité conditionnelle a été traitée. C'est un élément essentiel pour bien comprendre le fonctionnement des algorithmes d'apprentissage.
- En spécialité Mathématiques, la notion de produit scalaire de deux vecteurs du plan a été découverte. Cette notion, généralisée à des espaces de dimensions arbitrairement grands, permet l'introduction d'algorithmes d'intelligence artificielle comme le perceptron.

Lien(s) avec les chapitres précédents ou suivants du manuel :

Bibliographie :

- Livre de Mathématiques spécialité de première, plus particulièrement les chapitres sur le produit scalaire (LLS.fr/M1P226) et les probabilités conditionnelles (LLS.fr/M1P278).
- Russel et Norvig, *Intelligence artificielle* (2010) : c'est le livre de référence sur le sujet.

Sitographie :

- La biographie d'Alan Turing : https://fr.wikipedia.org/wiki/Alan_Turing

Idées d'activités alternatives ou complémentaires :

- Étudier des corrélations entre résultats en classe, et consommation de cannabis.
- Aborder la différence entre corrélation et causalité.
- Évoquer les problèmes induits par l'utilisation trop rapide d'une IA.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Activités

Ce chapitre balaie un spectre large de connaissances concernant l'informatique, le traitement des données et l'émergence de l'intelligence artificiel.
Les premières activités ont pour objectif d'introduire ces différentes notions pour ensuite les mobiliser dans différentes réflexions éthiques concernant l'usage des données (questions posées notamment par le big data) et des implications de l'intelligence artificielle.

Activité documentaire 1 : L'informatique, des débuts de l'écriture à nos jours (p. 234-235)

Le stockage et la transmission d'information est au cœur du développement des sociétés humaines. Cet activité a pour objectif de montrer différentes étapes du développement de l'informatique, depuis les premiers supports stockant l'information jusqu'à aujourd'hui.

Lien avec le programme :

- Jusqu'au début du XXe siècle, les machines traitant l'information sont limitées à une ou quelques tâches prédéterminées (tisser grâce à un ruban ou des cartes perforées, trier un jeu de carte perforées, séparer des cartes selon un critère, sommer des valeurs indiquées sur ces cartes, etc.). Turing a été le premier à proposer le concept de machine universelle, matérialisée dix ans plus tard avec les premiers ordinateurs. Ceux-ci sont constitués *a minima* d'un processeur et d'une mémoire vive.

Objectifs notionnels :

- Notion d'information.
- Automatisation.
- Machine universelle et ordinateurs.

Objectifs méthodologiques :

- Analyse des documents historiques relatifs au traitement de l'information et à son automatisation.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : La presse de Gutenberg
La presse de Gutenberg accélère la reproduction en grande quantité, sur support matériel, d'écrits et d'illustrations.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 2 : Le métier Jacquard
Le métier Jacquard permet à la fois d'accélérer le travail du tisserand, et de limiter la main d'œuvre, tout en programmant les motifs à tisser.

Document 3 : Différents supports d'information au cours du temps
De l'apparition de l'écriture en Mésopotamie, pour conserver la trace d'opérations comptables inhérentes à la gestion des centres urbains, aux clés USB, le besoin de stocker l'information demande des moyens technologiques de plus en plus poussés.

Document 4 : La machine universelle de Turing
La machine universelle de Turing, à l'origine de l'ordinateur conçu par John von Neumann.

Document 5 : Le modèle de von Neumann
Schéma simple présentant l'architecture d'un ordinateur telle que pensée par von Neumann.

Document 6 : Un programme informatique Python
Un programme en Python, pour illustrer la possibilité donnée à chacun de développer ses propres programmes, qui pourront ensuite être retrouvés dans de multiples technologies.

Réponses attendues aux questions :

1. La tablette d'argile et la clé USB permettent le stockage de l'information de manière pérenne. Les données conservées sur la clé USB pouvant être de quelques Mo à plusieurs Go. Ainsi, les données sont archivées pour pouvoir être traitées.

2. Le métier Jacquard est un progrès dans l'informatique, car il permet de stocker les instructions de traitement sur un support, et de les utiliser sans intervention humaine. Le programme Python permet à l'utilisateur de l'ordinateur de modifier la manière de traiter les données.

3. Le métier Jacquard, en automatisant la procédure de tissage, permet de libérer l'être humain d'une partie des tâches répétitives de tissage, souvent confiées à des enfants. La presse de Gutenberg permet à l'être humain de s'affranchir de la copie manuscrite des livres : cette automatisation a permis de diffuser le savoir à une échelle beaucoup plus grande.

4. La machine de Turing, en automatisant les longs et laborieux calculs nécessaires au déchiffrage des codes secrets allemands, a permis l'anticipation des mouvements ennemis (cf. bataille de Koursk), octroyant aux armées anglaises un avantage stratégique important.

5. Von Neumann a émis l'idée que le programme peut-être introduit dans la mémoire de l'ordinateur, il peut donc être changé et modifié sans altérer la structure même de l'ordinateur.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Protocoles et résultats expérimentaux

Analyser un programme informatique

Protocole :

- Reproduire et mettre en marche le programme Scratch.
- À chaque étape de l'exécution du programme, donner la valeur contenue dans la variable et l'instruction exécutée.
- Modifier le programme pour que la spirale tracée soit plus serrée.

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 2 : La taille d'un fichier (p. 236)

L'activité présente différents types de fichier informatiques et introduit le calcul de taille de fichier dans le cas le plus simple : fichier ASCII non compressé (1 caractère = 1 octet).

Lien avec le programme :

- Connaître l'ordre de grandeur de la taille d'un fichier image, son, et vidéo.
- Savoir calculer la taille en octets d'une page de texte (en ASCII et non compressé).

Objectifs notionnels :

- Taille des différents types de fichiers rencontrés dans le répertoire « Documents ».

Objectifs méthodologiques :

- Savoir estimer la taille d'un fichier texte, image, son et vidéo.

Autres compétences mobilisables dans cette activité :

- Connaître la notion de compression des données.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Les différents types de fichiers
Tableau récapitulatifs des quatre grands types de fichiers rencontrés dans le répertoire « Documents ».

Document 2 : Calcul de la taille d'un fichier texte
Taille d'un fichier .txt et codage ASCII.

Réponses attendues aux questions :

1. Pour le fichier son compressé, le coefficient de proportionnalité est donné par le tableau. Il est de 9 Mo par minute donc 0,15 Mo par seconde. Pour le fichier vidéo, il est de 10 Mo pour 5 min, donc de 2 Mo par minute (0,033 Mo par seconde) pour la basse résolution, et de 60 Mo pour 1 minute (1 Mo par seconde) pour la haute résolution.

2. ASCII est l'abréviation de *American Standard Code for Information Interchange*. Comme le code ASCII est d'origine américaine, il exclut un certain nombre de caractères, comme les caractères accentués ou les caractères cyrilliques. Pour remédier à ce problème, l'Unicode a été introduit en 1991.

3. Pour coder 275 000 caractères, il faut 275 000 octets, c'est-à-dire 275 ko.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Ressources complémentaires :

- L'ASCII expliqué : https://fr.wikipedia.org/wiki/American_Standard_Code_for_Information_Interchange
- Le code Unicode : https://fr.wikipedia.org/wiki/Unicode

Document sous licence libre Creative Commons

Activité documentaire 3 : Un algorithme fondamental de l'intelligence artificielle : le perceptron (p. 237)

Cette activité présente le fonctionnement du perceptron autrement appelé neurone artificiel. L'objectif ici n'est pas de décrypter le fonctionnement même du perceptron, mais d'en comprendre le principe.

Lien avec le programme :

- Analyser des documents relatifs à une application de l'intelligence artificielle. Utiliser une courbe de tendance (encore appelée « courbe de régression ») pour estimer une valeur inconnue à partir de données d'entraînement.
- Le terme « intelligence artificielle » (IA) recouvre un ensemble de théories et de techniques qui traitent de problèmes dont la résolution fait appel à l'intelligence humaine.

Objectifs notionnels :

- Analyse d'un élément de base des réseaux de neurones.
- Compréhension de la méthode de classification des informations, dans un objectif de prévision.
- Comparaison entre réseaux de neurones biologiques et artificiels.

Objectifs méthodologiques :

- L'apprentissage machine (ou « apprentissage automatique ») utilise des programmes capables de s'entraîner à partir de données. Il exploite des méthodes mathématiques qui, à partir du repérage de tendances (corrélations, similarités) sur de très grandes quantités de données (*big data*), permettent de faire des prédictions ou de prendre des décisions sur d'autres données.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Fonctionnement d'un neurone biologique
Le fonctionnement du neurone naturel reste très différent du neurone artificiel, mais un certain nombre de caractéristiques analogues permettent de bien présenter le neurone artificiel.

Document 2 : Le perceptron : un neurone artificiel
Schéma caractérisant les opérations mathématiques présentes au sein d'un neurone artificiel.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 3 : Utilisation du perceptron
Exemple des différentes étapes d'apprentissage du perceptron : à chaque étape, à l'aide de produits scalaires, l'algorithme va essayer de définir une meilleure frontière entre les points bleus, avec une valeur égale à 1, et les points rouges, avec une valeur égale à -1.
Dans un second temps, on peut prévoir la valeur associée à un point, en fonction de sa position par rapport à la frontière.

Document 4 : Vue d'artiste d'un réseau de neurones
Document illustratif pour témoigner de la complexité d'un réseau neuronal complet.

Réponses attendues aux questions :

1. Le perceptron, comme le neurone naturel, reçoit des stimulations de plusieurs sources, puis après le traitement de ces stimulations, génère une réponse. Il est cependant différent du neurone naturel, car la manière dont il traite les stimulations est un simple produit scalaire suivi d'une fonction d'activation, alors que le fonctionnement du neurone naturel est beaucoup plus complexe, notamment parce qu'il intègre le traitement de stimuli contradictoires.

2. Les points rouges sont tous à droite de la droite, et les points bleus à gauche. On peut donc généraliser et déduire que le point jaune, devrait être bleu.

3. Si on place dans un plan les points dont les coordonnées sont les notes de l'année de plusieurs étudiants, et que l'on sait si chacun d'entre eux a obtenu son diplôme, on peut en déduire si un nouvel étudiant aura son diplôme, en ayant connaissance de ses notes de l'année.

Ressources complémentaires :
- Un article sur le perceptron : https://fr.wikipedia.org/wiki/Perceptron
- Russell et Norvig, *Intelligence Artificielle*, 2010.
- Sur les neurones biologiques : https://www.reseau-canope.fr/corpus/video/le-message-nerveux-227.html

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 4 : L'intelligence artificielle, des applications concrètes (p. 238)

Dans cette activité, les élèves sont amenés à travailler sur des exemples concrets de l'utilisation de l'intelligence artificielle. Deux points essentiels de l'utilisation de l'IA sont abordés : la nécessité d'un entraînement avec une base de données initiale importante et la nécessité d'acquérir de nouvelles données pour prendre une décision.

Lien avec le programme :

- La qualité et la représentativité des données d'entraînement sont essentielles pour la pertinence des résultats. Les biais dans les données peuvent se retrouver amplifiés dans les résultats.
- Sur des exemples réels, reconnaître les possibles biais dans les données, les limites de la représentativité.

Objectifs notionnels :

- Analyser un exemple d'utilisation de l'intelligence artificielle : identifier la source des données utilisées et les corrélations exploitées.

Objectifs méthodologiques :

- De nombreuses situations de la vie courante peuvent donner lieu aux mêmes analyses, et résumer le fonctionnement d'une intelligence artificielle.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Détecter les problèmes de peau
Données d'apprentissage, qui correspondent aux points rouges et bleus de l'algorithme vus dans l'activité précédente. Le grain de beauté diagnostiqué correspond au point jaune.

Document 2 : La voiture autonome
Présentation des différents capteurs classiques présents sur une voiture autonome. Ces capteurs remplacent en particulier les yeux du conducteur, pour représenter le milieu dans lequel la voiture évolue.

Document 3 : Les données de la voiture autonome
Un réseau de neurones transforme une série de données en décision. Souvent, les étapes intermédiaires sont mal maîtrisées ou mal connues par l'utilisateur. D'un point de vue éthique, l'aspect boîte noire peut être reproché, car les décisions ne sont pas le résultat d'un raisonnement transparent.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Réponses attendues aux questions :

1. Si des erreurs de diagnostic se trouvent dans les données qui servent à entraîner une intelligence artificielle, cette dernière risque de mal apprendre et donc de généraliser des erreurs de diagnostic à des cas nouveaux. La qualité des données d'entraînement est cruciale à un entraînement efficace d'une IA.

2. Le capteur radar reçoit des données sur la distance entre la voiture et un éventuel obstacle.
La caméra vidéo fournit des informations visuelles qui pourront être interprétées par l'intelligence artificielle de la voiture, notamment la présence de panneaux de circulation et leur sens.
Le GPS fourni à la voiture des informations précises sur sa position et sa vitesse. Ces informations sont nécessaires pour planifier son parcours.
Le capteur laser permet de détecter les objets qui se trouvent autour de la voiture pour lui offrir une modélisation précise de son environnement. Ce capteur complète le capteur radar.
Le capteur ultrasonique a le même rôle que le capteur radar.

3. Si le capteur radar détecte un obstacle et que la caméra l'identifie comme un être humain, la voiture décidera de s'arrêter. Si le GPS indique que la voiture est sur une route de campagne, mais que la caméra indique la présence de nombreuses personnes, l'intelligence artificielle adaptera sa vitesse pour assurer la sécurité des passagers et des autres utilisateurs.

Ressources complémentaires :

- Les biais du jugement, très divers, peuvent être évoqués pour présenter les défauts possibles d'une intelligence artificielle, mal entraînée. La qualité et la représentativité des données d'entraînement sont essentielles pour la qualité des résultats.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité documentaire 5 : L'intelligence artificielle dans la vie de tous les jours (p. 239)

Cette activité présente un ensemble de situations du quotidien pour lesquelles les ordinateurs et l'intelligence artificielle peuvent intervenir.

Lien avec le programme :

- Recenser les différentes situations de la vie courante où sont utilisés les ordinateurs. Identifier lesquels sont programmables et par qui (thermostat d'ambiance, smartphone, box internet, ordinateur de bord d'une voiture, etc.).

Objectifs notionnels :

- Omniprésence des ordinateurs dans le monde moderne.

Objectifs méthodologiques :

- Rendre visible l'omniprésence des systèmes informatiques.
- Aider à comprendre le fonctionnement de ces systèmes et notre dépendance à ceux-ci.

Durée estimée : 60 minutes.

Présentation des documents

Document 1 : Une journée de Sara
Infographie présentant les différentes activités de la journée, et l'omniprésence de l'informatique.

Réponses attendues aux questions :

1. Par exemple, lorsque Sara se rend sur un site de vente en ligne, une IA lui propose en priorité des produits susceptibles de l'intéresser.

2. L'intelligence artificielle accumule les observations de la vie de Sara. Ces observations servent de données d'entraînement et permettent à l'IA de s'adapter à chaque nouvelle situation de la vie de Sara.

3. L'intelligence artificielle a un impact positif sur la vie de Sara, car elle l'affranchit de tâches répétitives et fastidieuses, comme conduire la voiture ou rédiger la liste de course. De plus, elle aide Sara à agir de manière optimisée en lui proposant un programme de révision adaptée à ses résultats ou des repas équilibrés.
Cependant, l'intelligence artificielle, en lui proposant des contenus multimédia adaptés à ses goûts, exclut de fait tous les contenus susceptibles de la surprendre ou de faire évoluer ses opinions, ce qui ne contribue pas au développement de l'esprit critique.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Activité de groupe 6 : Informatique et éthique (p. 240-241)

Cette activité de groupe permet d'amorcer une réflexion sur les questions éthiques qui entourent l'informatique. Avec la prolifération des données, notamment des données personnelles, ces questions vont être essentielles pour l'avenir.
De la même manière, l'intelligence artificielle sera peut-être amenée à prendre des décisions concernant la vie humaine : quelles en sont alors les implications ?

Lien avec le programme :

- Expliquer pourquoi certains usages de l'IA peuvent poser des problèmes éthiques.

Objectifs notionnels :

- Qui prend la décision ?
- Quelle liberté dans la décision est déléguée à la machine ?
- Comment établir les règles ?
- Quelles sont les sources du *big data* ?

Objectifs méthodologiques :

- Le recours à la science-fiction permet de présenter de nombreux scénarios catastrophes.
- L'appétit des entreprises pour la récupération des données doit être présenté aux élèves, pour leur permettre d'en saisir les enjeux, et les risques.

Durée estimée : 90 minutes.

Groupe 1 : Puisqu'il faut choisir

Présentation des documents

Document 1 : Un extrait du film *Matrix*
Lorsqu'il s'agit de questions d'avenir et de technologies pas encore développées, les premières réflexions ne sont pas amenées par les scientifiques mais par les auteurs de fiction. La science-fiction en particulier permet de proposer des réflexions sur des situations qui n'auront peut-être jamais lieu, mais qui nous permettent d'éclairer le champ des possibles.

Document 2 : Qu'est-ce que le moindre mal ?
Les voitures autonomes font partie des premières situations concrètes dans lesquels l'utilisation de l'intelligence artificielle peut mettre en jeu des vies humaines. Se pose alors la question de la prise de la décision dans ces situations.

Document 3 : Les lois de la robotique d'Asimov
Parmi les auteurs de science-fiction, Isaac Asimov fait référence. Ses trois lois de la robotiques ont inspiré de nombreux auteurs.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Ressources complémentaires :

- Le film *I Robot* permet de présenter la problématique des robots d'Asimov.
- Le document 2 peut être complété par d'autres sondages, présentant la diversité des réponses aux questions posées, en fonction du sondé.

Groupe 2 : Le *big data*, les dangers, les complications

Présentation des documents

Document 4 : Extrait des conditions d'utilisation de Facebook
En 2020, Facebook est le réseau social le plus utilisé dans le monde. Son modèle économique se base sur l'utilisation et la commercialisation des données fournies par ses utilisateurs.

Document 5 : Le scandale Cambridge Analytica
Le scandale Cambridge Analytica est un exemple des dérives possibles d'une utilisation abusive des données des utilisateurs des réseaux sociaux.

Document 6 : Le RGPD pour les entreprises
Afin de réguler l'utilisation des données personnelles, la France a promulgué un règlement général sur la protection des données.

Document 7 : Cas concret
Présentation d'un cas concret où la gestion des données peut conduire à des surprises.

Suggestions de réponses aux indicateurs de réussite

Groupe 1 :

1. Si une voiture autonome doit choisir entre éviter un piéton, au risque de tuer ses occupants, et la mort certaine du piéton si elle le percute, quel choix doit-elle faire ?

2. Une échelle de valeur morale présente plusieurs problèmes : notamment celui de savoir à qui revient le droit de fixer cette échelle de valeur. Est-ce le constructeur ? le propriétaire ? l'utilisateur ?

3. Même un système objectif de valeur présente toujours des cas particuliers obligeant à une réflexion plus approfondie.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Groupe 2 :

1. La fuite de données du document 5 concerne les données de plusieurs millions de personnes, mais ce sont des données que les utilisateurs ont librement confié à Facebook, théoriquement en connaissance du contrat d'utilisation. Dans le deuxième exemple, la fuite de données concerne une personne en particulier et des données confidentielles, dont la divulgation a mené à une discrimination.

2. Le RGPD oblige les entreprises à conserver une trace des traitements de données, à obtenir le consentement des utilisateurs et à sécuriser l'accès aux données personnelles. Ainsi, le commerce des données n'est pas impossible, il est simplement encadré afin de permettre le respect des droits et des libertés des utilisateurs.

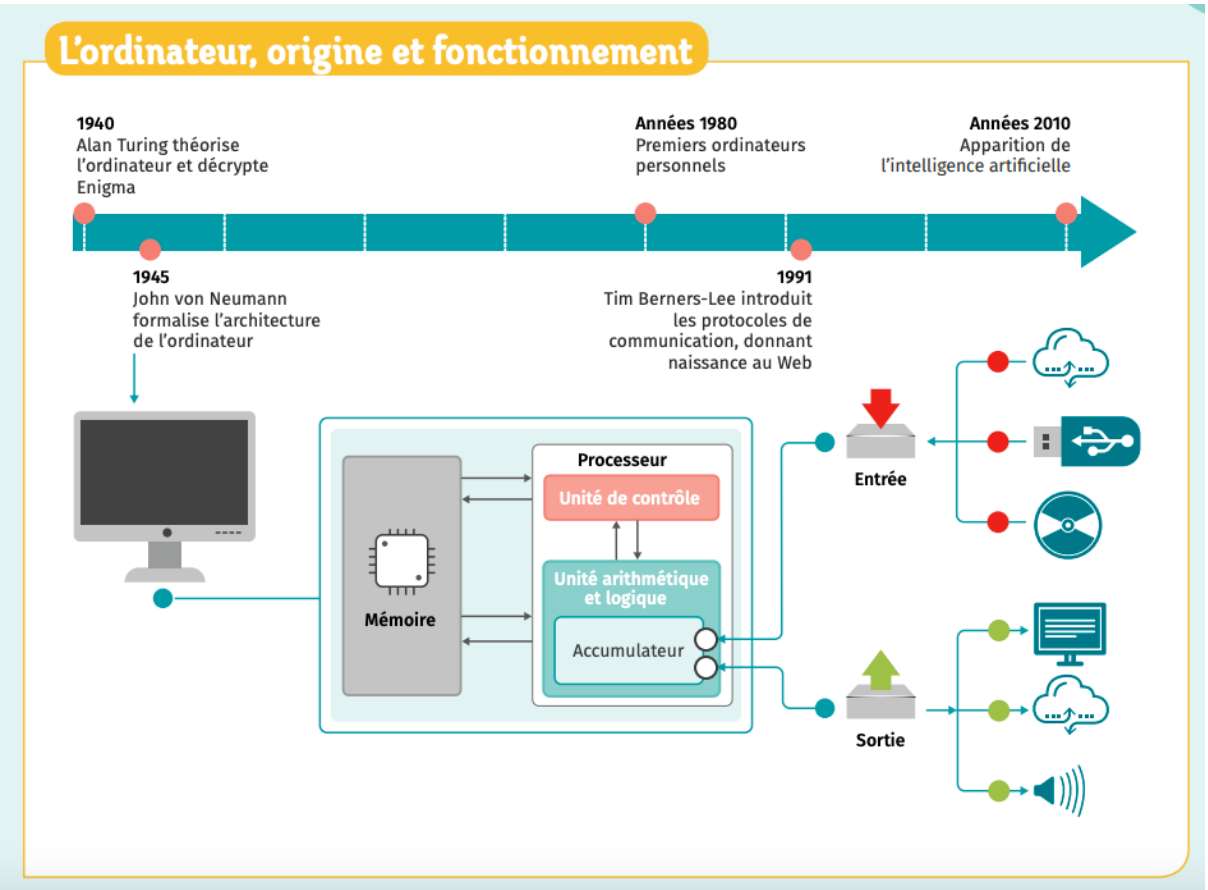
3. Un commerce des données non réglementé implique que les données peuvent être collectées sans le consentement ou même l'information des utilisateurs. De même, sans réglementation sur le commerce des données, la divulgation et la vente de données sensibles, par exemples médicales, devient possible, entraînant des risques de discrimination.

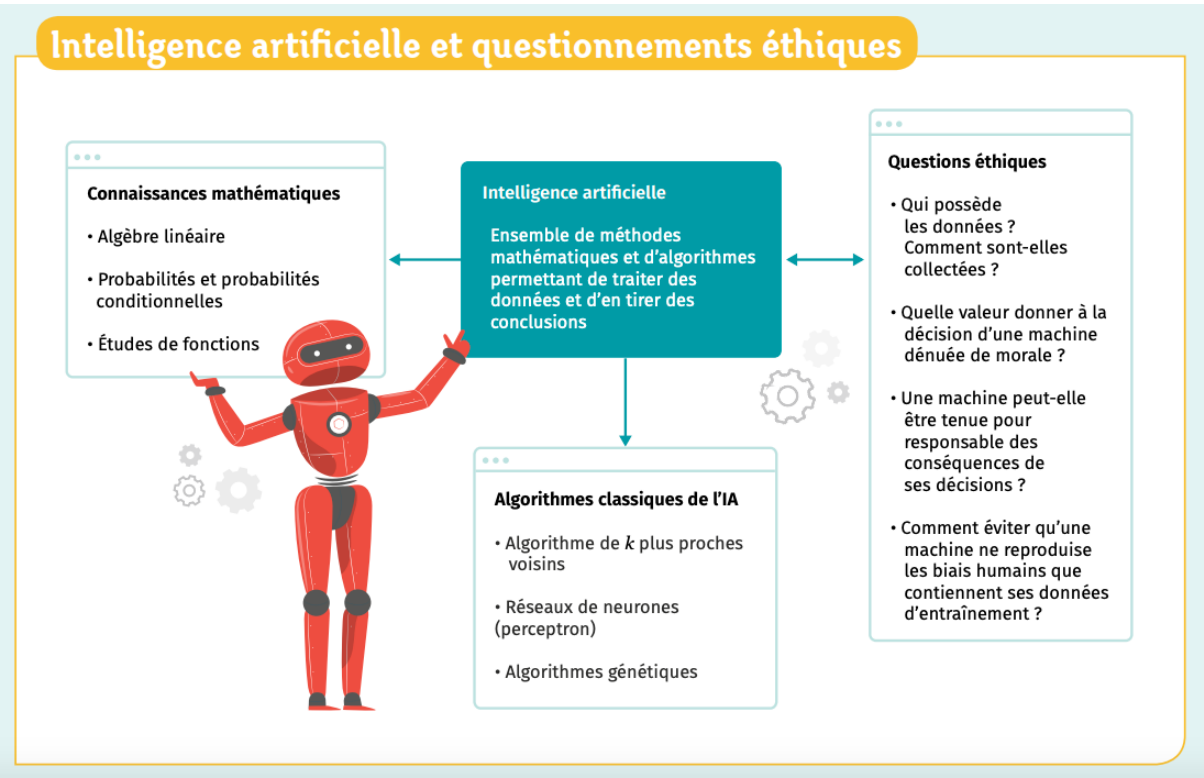
Ressources complémentaires :

- Science4all, La morale des gens heureux : l'utilitarisme : https://www.youtube.com/watch?v=Uu6K0uR9bus
- Monsieur Phi, à chacun sa morale ? https://www.youtube.com/watch?v=7KmAKVaO-Xc&list=PLuL1TsvlrSndG1xYLRsaNvSM46lOkOg2W

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Bilan (p. 243)





Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Exercices

Zone d'échauffement (p. 244)

1. L'apport majeur de von Neumann à l'informatique est :

b. l'invention d'un modèle d'architecture regroupant programme et données dans la mémoire.

La machine à tisser programmable est l'œuvre de Jacquard et la machine qui a permis le décryptage des codes secrets allemands pendant la Seconde guerre mondiale est l'œuvre d'Alan Turing (et d'autres ingénieurs).

2. Quel est l'ordre de grandeur de la capacité de stockage d'un disque dur moderne ?

a. 1 téraoctet.

Un disque dur moderne peut contenir plusieurs téraoctets de mémoire. Les serveurs de grandes entreprises peuvent atteindre plusieurs pétaoctets.

3. Le livre *Oui-oui au pays des jouets* est constitué de 2 000 caractères. Afin d'être archivé, il a été entièrement recopié dans un fichier texte. Quel est l'ordre de grandeur de sa taille en mémoire ?

d. 1 kilooctet.

Chaque caractère occupant un octet (en codage ASCII), le livre occupera 2 000 octets. La taille en mémoire de ce livre est de l'ordre du kilooctet. On pourra noter que le codage ASCII est obsolète et en cours de remplacement par l'Unicode qui permet de coder beaucoup plus de caractères.

4. Parmi ces situations de la vie courante, laquelle/lesquelles peut/peuvent faire l'objet d'une application par une intelligence artificielle ?

Toutes ces situations de la vie courante peuvent faire l'objet d'un traitement par l'intelligence artificielle :

- la gestion des données de passagers afin d'optimiser la taille des trains fait déjà l'objet d'un traitement automatisé ;
- le traitement des données médicales permet de détecter des maladies avec une meilleurs acuité qu'avec un médecin. C'est une précieuse aide à la décision. On pourra se référer à l'activité 4 ;
- une intelligence artificielle peut proposer des activités adaptées aux goûts de la personne et aux prévisions météorologiques ;
- une intelligence artificielle peut aider à déterminer les choix budgétaires les plus pertinents à faire.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

5. Une des éditions du roman *Germinal* d'Émile Zola compte 500 pages de texte. La taille approximative, en octets, d'un fichier contenant l'intégralité de ce roman est de 1 Mo.

- 1 Mo est nécessaire pour stocker 500 pages. Ainsi, par une relation de proportionnalité une page nécessite environ $\frac{1}{500}\ \mathrm{Mo} = 2\ \mathrm{Ko}$

6. Dans chaque application de l'intelligence artificielle, préciser une source de données possible. Citer à chaque fois une corrélation qui peut être exploitée par l'intelligence artificielle.

a. Météo France fournit les données sur la météo. On peut utiliser par exemple la relation entre la présence de nuages et de températures négatives pour prédire l'apparition de neige. On trouvera ces données à l'adresse suivante : https://donneespubliques.meteofrance.fr/

b. La voiture autonome reçoit des données de capteurs installés sur la carrosserie. L'intelligence artificielle qui conduit la voiture, peut exploiter les données sur la luminosité pour régler sa vitesse.

c. Une enceinte connectée reçoit des données en écoutant en permanence son environnement.

d. Les intelligences artificielles utilisées pour détecter des fraudes à l'assurance peuvent utiliser les données des statistiques officielles sur les accidents de la route, afin d'étudier la possibilité d'un endormissement au volant quand l'accident a eu lieu de nuit. On pourra trouver des données très détaillées à l'adresse : data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-accidents-corporels-de-la-circulation/

7. Les personnes suivantes ont toutes contribué au développement de l'informatique. Laquelle a formalisé l'architecture moderne des ordinateurs ?

a. John Von Neumann.

Geoffrey Hinton est l'inventeur de l'algorithme de la rétropropagation qui est un algorithme central de l'intelligence artificielle. Tim Berners Lee est l'inventeur du web au début des années 1990. Bill Gates est le fondateur de Microsoft, l'une des plus grandes entreprises technologiques. Pour plus de détails, on pourra consulter la page Wikipédia de chacune de ces personnes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

L'atelier des apprentis (p. 245)

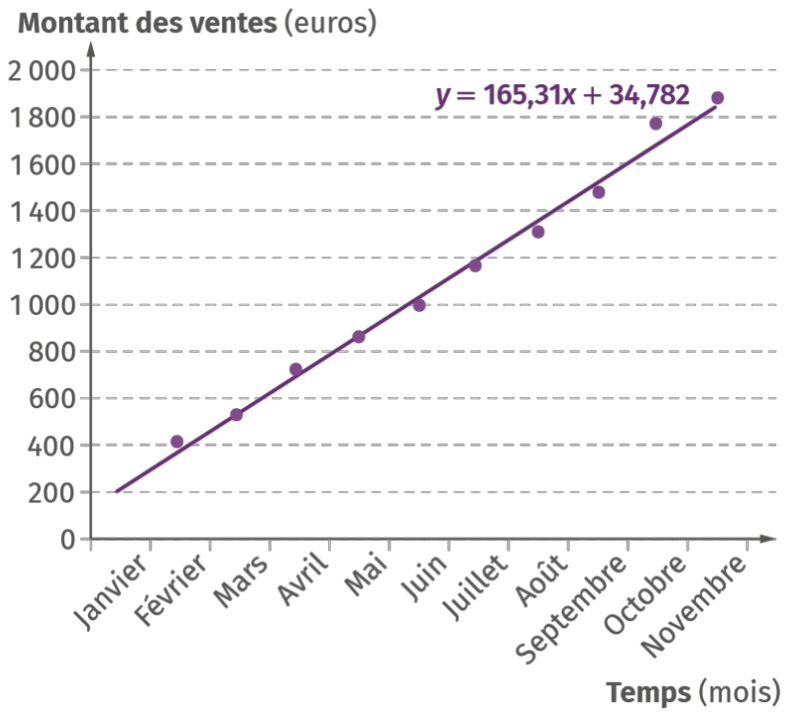
8. Prédiction

Compétence principalement travaillée : Exploiter des situations de corrélations et des courbes de tendance

Correction :

1. Entre janvier et novembre, les ventes ont augmenté. Cependant, n'indique pas à quelle vitesse les ventes ont augmenté.

2.



La droite qui s'approche le plus est la droite d'équation $y = 165,31x + 34,782$. Pour le mois de décembre, on peut conjecturer que les ventes suivront cette tendance, avec $x = 12$ on obtient 2 018,5. On peut donc imaginer que les ventes seront de 2 019 unités en décembre.

3. Les données ont dues être collectées sur toute l'année : même si une droite peut être définie de manière unique avec seulement 2 points, la présence de données supplémentaires permet de lisser les erreurs, les fluctuations et le bruit. Ainsi, on obtient une véritable tendance permettant de conjecturer une valeur pour décembre.

Suggestion de questions supplémentaires :

4. **Les autres types de courbes de tendance (exponentielles, puissances, etc.) donnent-elles de meilleures approximations ?**
On peut constater que la courbe qui permet la meilleur approximation est la droite. Il est important de noter ici que le choix du type de courbe de tendance se fait à l'aide de

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

personnes ayant des compétences dans le domaine que l'on étudie. Ces personnes sont mieux à même de choisir le type de courbe de tendance. De manière générale, quand on étudie des données à grande échelle, on ne peut jamais se passer d'un professionnel du sujet.

9. Tableau à double entrée

Compétence principalement travaillée : Traiter des données pour déterminer les probabilités de cause

Correction :

1.

	Latin	Grec	Total
Filles	500	700	1 200
Garçons	100	700	800
Total	600	1 400	2 000

2. La probabilité qu'un élève choisit au hasard dans le lycée soit une fille faisant du latin est $\frac{500}{2\ 000} = \frac{1}{4}$.

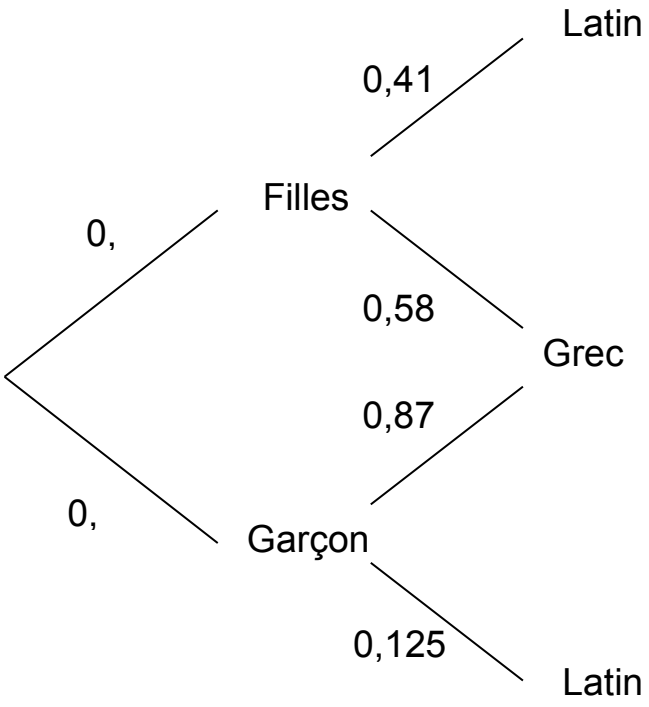
3. La probabilité qu'une fille choisie au hasard dans le lycée fasse du latin est $\frac{500}{1\ 200} = \frac{5}{12}$.

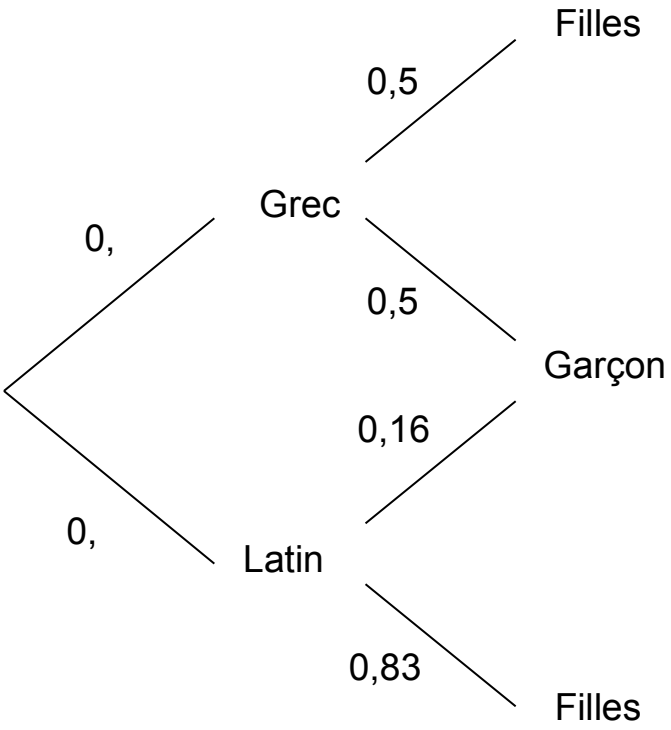
4. La probabilité qu'un élève faisant du latin soit une fille est $\frac{500}{600} = \frac{5}{6}$.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Suggestion de questions supplémentaires :

5. Transformer le tableau en deux arbres pondérés (pour les élèves ayant choisi la spécialité Mathématiques en première).





Document sous licence libre Creative Commons

10. Débogage d'un programme avec Python

Compétence principalement travaillée : Tester et corriger un algorithme simple

Rappel du programme :

```
n=1
while n<21:
      print(n*n)
n=n+1
```

Correction :

1. Le programme affiche des 1 sans s'arrêter. En effet, la variable a été initialisée à 1 et ne change jamais dans la boucle `while`. Ainsi, la condition pour que la boucle soit effectuée est toujours vraie. Donc, la boucle ne s'arrête jamais.

2. Il suffit de mettre une indentation à la ligne 4. Ainsi, l'instruction sera dans la boucle et la variable *n* sera augmentée de 1 à chaque passage dans la boucle. Le critère pour que la boucle soit effectuée ne sera plus valable au bout de 20 passages dans la boucle. Le programme s'arrêtera après avoir affiché les carrés des nombres entiers de 1 à 20.

Correction de l'exercice décliné en version initié :

Compétence principalement travaillée : Tester et corriger un algorithme simple

1. **Tester et corriger le programme.**
Il suffit de mettre une indentation à la ligne 4. Ainsi, l'instruction sera dans la boucle et la variable *n* sera augmentée de 1 à chaque passage dans la boucle. Le critère pour que la boucle soit effectuée ne sera plus valable au bout de 20 passages dans la boucle. Le programme s'arrêtera après avoir affiché les carrés des nombres entiers de 1 à 20.

2. **On a modifié le programme pour qu'il affiche cette fois seulement le carré des nombres impairs. Le tester et le corriger le cas échéant.**

Le programme :

```
n=1
while n<4:
  print(n*n)
  n=2*n+1
```

Ici l'erreur vient d'une erreur sur le calcul des entiers impairs. Effectivement ceux-ci sont de la forme `n=2k+1` où k est un entier, mais n et k sont alors deux nombres différents. Or ici la formule `n=2*n+1` s'applique à n alors qu'elle devrait s'appliquer à k.

Deux options sont alors possibles :

- On transpose directement la remarque précédente en faisant non plus un comptage sur les n mais sur les k.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le programme :

```
k=0
n=2*k+1
while n <10:
  print(n*n)
  k=k+1
  n=2*k+1
```

- Plus élégamment : on se rend compte qu'on passe d'un impair à l'autre en ajoutant 2, on supprime donc le comptage en k. Il faut alors simplement initier le comptage sur un impair.

Le programme :

```
n=1
while n <10:
  print(n*n)
  n=n+2
```

Document sous licence libre Creative Commons

Le repaire des initiés (p. 246-247)

11. Biais du survivant

Compétence principalement travaillée : Exploiter des situations de corrélations et des courbes de tendance

Correction :

1. Les données sont récoltées sur les avions étant rentrés de mission. Ceux qui ont été abattus en vol ne sont pas comptabilisés, les données fournies sont donc partielles.

2. Au premier abord, on peut penser qu'il est pertinent de renforcer les endroits qui ont été le plus touchés.

3. Les avions qui ont été étudiés sont ceux qui sont revenus de mission, ainsi les dommages qu'ils ont subi sont mineurs et n'ont pas empêché les avions de voler. Aucun des avions rentrés de mission n'a été touché sur les moteurs ou sur le cockpit, certainement car les avions qui ont été touchés à l'un de ces endroits (indispensables au fonctionnement de l'avion) ne sont pas revenus de mission. C'est donc à ces endroits qu'il faut renforcer le blindage.

4. Bien connaître son échantillons et ses limites permet donc d'éviter de faire des erreurs qui parfois peuvent aller à contresens d'une bonne interprétation. Dans cette situation, sans connaître l'échantillon de base, on aurait renforcé les avions non pas aux endroits indispensables mais au contraire aux endroits ayant peu d'importance.

Sources/Bibliographie :

- Article Wikipédia sur le biais du survivant : https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_du_survivant

12. Recherche de corrélations

Compétence principalement travaillée : Exploiter des situations de corrélations et des courbes de tendance

Correction :

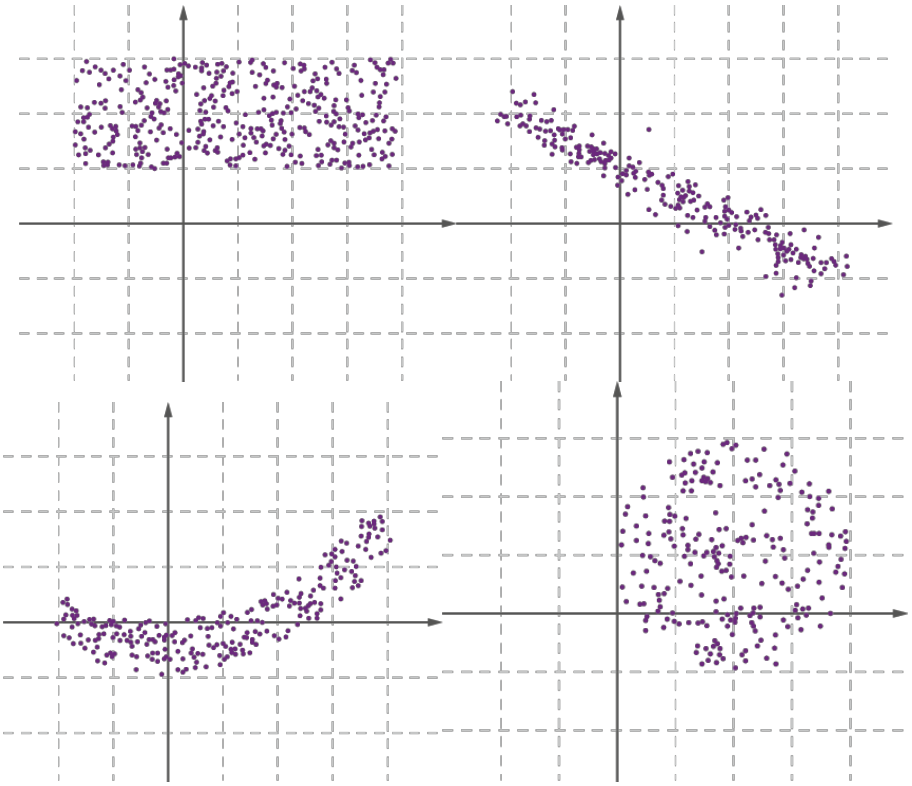
1. C'est dans les exemples b et c qu'il semble y avoir une forte corrélation entre les données. On remarque en effet que les points sont, dans chacun des cas, distribués autour d'une droite.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Exploiter des situations de corrélations et des courbes de tendance

1. Parmi les 4 nuages de points ci-dessous, précisez ceux qui correspondent à une situation où les abscisses et les ordonnées sont fortement corrélées.



Il y a corrélations dans tous les cas, sauf dans le premier. Dans le deuxième cas, on peut supposer que les deux variables sont reliées par une fonction affine. Dans le troisième, il semble que l'ordonnée est l'image par une fonction polynôme du second degré de l'abscisse. Dans le quatrième cas, il semble que la somme des carrés des deux variables soit bornée.

13. Déterminer si un nombre est premier

Compétence principalement travaillée : Tester et corriger un algorithme simple

Programme :

```
N=5
reponse="premier"
for i in range (1,N-1):
      if N%i=0:
            reponse="pas premier"
print (reponse)
```

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction :

1. Chacun des nombres testés semble ne pas être premier. Pourtant, 7 et 11 le sont.

2. Pour tester ce programme on peut prendre :
   - un nombre premier, par exemple 13 ;
   - un nombre non premier, par exemple 15 ;
   - un nombre non premier, mais qui est le carré d'un nombre premier, par exemple 25 (ce cas sera utile surtout si l'on envisage d'améliorer le programme en testant uniquement jusqu'à $\sqrt{N}$) ;

On pourra également tester les cas particuliers que sont 1 (non premier) et 2 (premier mais pair).

3. Il suffit d'effectuer les divisions à partir de 2, ainsi la ligne 3 devient : « `for i in range(2,N-1)` ». On pourra également traiter à part les cas 1 et 2. Le programme devient alors :

```
N=25
reponse="premier"

if N==1:
      reponse="non premier"
elif N==2:
      reponse="premier"
else :
      for i in range (2,N):
            if N%i==0:
                  reponse="non premier"
print (reponse)
```

Suggestion de questions supplémentaires :

4. **Est-il nécessaire de tester toutes les divisions entre 2 et N-2 ?**

Non, on peut se contenter de tester les divisions jusqu'à $\sqrt{N}$. Ainsi, le programme devient :

```
from math import *

N=25
reponse="premier"

if N==1:
      reponse="non premier"
elif N==2:
      reponse="premier"
else :
      for i in range(2,int(sqrt(N))+1):
            if N%i==0:
                  reponse="non premier"
print (reponse)
```

On pourra noter que le programme ainsi modifié est beaucoup plus rapide.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Correction de l'exercice décliné en version expert :

Compétence principalement travaillée : Tester et corriger un algorithme simple

1. Tester et corriger si nécessaire le programme proposé
Pour tester ce programme on peut prendre :
- un nombre premier, par exemple 13 ;
- un nombre non premier, par exemple 15 ;
- un nombre non premier, mais qui est le carré d'un nombre premier, par exemple 25 (ce cas sera utile surtout si l'on envisage d'améliorer le programme en testant uniquement jusqu'à $\sqrt{N}$) ;

On pourra également tester les cas particuliers que sont 1 (non premier) et 2 (premier mais pair).

Pour le corriger, il suffit d'effectuer les divisions à partir de 2, ainsi la ligne 3 devient : « `for i in range(2,N-1)` ». On pourra également traiter à part les cas 1 et 2. Le programme devient alors :

```
N=25
reponse="premier"

if N==1:
      reponse="non premier"
elif N==2:
      reponse="premier"
else :
      for i in range(2,N):
            if N%i==0:
                  reponse="non premier"
print (reponse)
```

14. Le poids informatique de trois ans de travail

Compétence principalement travaillée : Avoir des connaissances basiques sur le fonctionnement de l'informatique

Correction :

1. En caractère ASCII, un caractère occupe 1 octet de mémoire.

2. La thèse occupe donc 795 089 octets soit 0,8 Mo environ.

3. D'après le cours, un podcast de 10 min occupe 10 Mo de mémoire.

Ressources complémentaires :
- Fonctionnement d'un ordinateur ; référence au binaire.
- Taille des disques durs, et capacités en termes de morceaux de musique ou de films.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

15. Classification du courrier électronique

Compétence principalement travaillée : Analyser des documents et des situations mettant en jeu l'intelligence artificielle.

> Le signalement par les usagers de messages considérés comme indésirables permet aux messageries électroniques de constituer une base conséquente et constamment alimentée à partir de laquelle le système peut apprendre à déterminer les caractéristiques des spams qui vont ensuite lui permettre de proposer de lui-même quels messages filtrer.
>
> Extrait du document CNIL, *Comment permettre à l'Homme de garder la main ?*

Correction :

1. Sur 1 000 000 mails envoyés, il y a d'après l'énoncé entre 550 000 et 950 000 spams, et entre 50 000 et 450 000 mails légitimes. Pour mener la suite des calculs, on suppose qu'il y a 750 000 spams, et 250 000 mails légitimes.
Après le premier filtre, il reste donc entre 55 000 et 95 000 spams, et toujours entre 50 000 et 450 000 mails légitimes. Avec notre hypothèse de travail, il reste 75 000 spams, et 250 000 mails légitimes.
Parmi ces 75 000 spams, 95 % d'entre eux, soit 71 250, vont dans la catégorie « Indésirables », tandis que 3 750 atterrissent dans la boîte de réception.
Parmi les 250 000 mails légitimes, 237 500 d'entre eux arrivent bien dans la boîte de réception, alors que 12 500 échouent dans la catégorie « Indésirables ».
Dans le dossier Indésirables, on a donc 83 750 mails, dont 12 500 légitimes, soit une proportion proche de 15 %.
Dans la boîte de réception, on a 241 250, dont 3 750 spams, soit une proportion proche de 1,6 %.

2. Vu le nombre très élevé de spams envoyés (trois quarts des mails), les outils anti-spam permettent d'avoir une proportion réduite de spams dans la boîte de réception. Le problème réside ici plutôt dans la proportion non négligeable de mails légitimes qu'il faut récupérer dans le dossier « Indésirables ».

Sources/Bibliographie :

- https://www.arobase.org/actu/chiffres-email.htm

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Le coin des experts (p. 248)

16. Faux positifs, faux négatifs

Compétence principalement travaillée : Traiter des données pour déterminer les probabilités de cause

Correction :

1.

	Test négatif	Test positif	Total
Patient malade	1	99	100
Patient sain	9 989 900,1	9 999,9	9 999 900
Total	9 989 901,1	10 098,9	10 000 000

2. Parmi les 10 099 personnes testées positivement, seules 99 sont malades, soit environ 1 %.

Suggestion de questions supplémentaires :

3. Quel est alors l'intérêt d'un tel test ?
Un tel test permet déjà un premier tri entre personnes saines et personnes potentiellement malades, en particulier si le test n'est pas onéreux.

Correction de l'exercice décliné en version apprenti :

Compétence principalement travaillée : Traiter des données pour déterminer les probabilités de cause

On donne la répartition des résultats d'un test médical pour des patients malade ou sain.

	Test négatif	Test positif	Total
Patient malade	1	99	100
Patient sain	9 989 900,1	9 999,9	9 999 900
Total	9 989 901,1	10 098 9	10 000 000

1. Calculer la probabilité d'un faux négatif (test négatif alors que le patient est malade).
La probabilité d'un faux négatif est de 1/9 989 901 = 0,000 01 %

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

2. Calculer la probabilité d'un faux positif (test positif alors que le patient est sain). Que dire alors à une personne dont le test est positif ?
La probabilité d'un faux positif est de 9 999,9/10 098,9 = 99,02 %. Donc une personne pour laquelle le test est positif a de fortes chances d'être en bonne santé.

17. Corrélation et prédiction

Compétence principalement travaillée : Tester et corriger un algorithme simple

Correction :

1. Sur les 2 candidats qui ont eu 3 ou plus à au moins deux épreuves, 2 ont été admis, soit 100 % des candidats qui ont eu 3 ou plus à au moins deux épreuves.

2. Sur les 4 candidats qui ont eu 3 ou plus à la première note, 2 ont été admis, soit 50 % des candidats qui ont eu 3 ou plus à la première note.

3. Sur les 4 candidats ayant la lettre A comme première lettre de leur prénom, seul 1 a été lauréat, soit 25 % des candidats ayant la lettre A comme première lettre de leur prénom.

4. La réponse à la première question ne nous permet pas de conclure, car elle ne s'adapte pas à la situation. La première note d'Alice laisse penser à une chance sur 2 de réussir, et son prénom à une chance sur 4. Heureusement, cette situation est caricaturale, et l'échantillon trop faible. Cependant, des corrélations existent entre réussite au bac et prénom. Il n'y a pas de cause à effet, mais le milieu social influe sur le choix des prénoms, donc la réussite scolaire.

Ressources pour aller plus loin :
- Statistiques sur la corrélation entre le prénom et la réussite au baccalauréat : https://www.lemonde.fr/campus/article/2018/07/19/bac-2018-les-prenoms-qui-obtiennent-le-plus-de-mention-tres-bien_5333632_4401467.html
- Études sur le lien entre consommation de cannabis et résultats scolaires : https://www.observatoire-sante.fr/la-cannabis-influence-t-il-les-resultats-scolaires/

18. Scandale à la cantine

Compétence principalement travaillée : Traiter des données pour déterminer les probabilités de cause

Correction :

1. En seconde, environ 16,7 % des élèves se resservent, mais ne sont comptés qu'une seule fois. En seconde, 10 % des élèves ne se resservent pas, mais sont comptés deux fois. En terminale, 16 % des élèves se resservent, mais ne sont comptés qu'une seule fois. En terminale, 4 % des élèves ne se resservent pas, mais sont comptés deux fois.

2. Les élèves de terminale voient un intérêt à manger plus, sans payer plus. Les élèves de seconde peuvent constater que 3 élèves qui ne se resservent pas sur 13 sont tout de même comptés deux fois.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

3. Le fait de ne mesurer les comportements qu'une seule journée de la semaine entraîne des résultats biaisés : il suffit que les comportements du jeudi soient impactés par une contrainte d'emploi du temps (par exemple les spécialités de terminale) pour créer une erreur dans les prévisions.

Suggestion de questions supplémentaires :

4. Comment améliorer le système ?
On peut proposer les améliorations suivantes :
- augmenter les mesures et les réaliser chaque jour de la semaine ;
- créer un rétrocontrôle pour affiner les prévisions.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Fiches méthode

Présentation **2**

Esprit critique et scientifique **3**

Fiche méthode 2 : Différencier savoir, opinion et savoir (p. 271) 3

Fiche méthode 3 : Apprécier la fiabilité d'une information sur Internet et savoir détecter les infox (p. 272-273) 4

Fiche méthode 4 : Reconnaître et interpréter une relation de corrélation (p. 274-275) 5

Fiche méthode 6 : Identifier les différents biais cognitifs (LLS.fr/ESTFM) 7

Améliorer ses compétences **11**

Fiche méthode 9 : Préparer et réaliser une présentation orale (p. 277) 11

Fiche méthode 13 : Préparer une fiche ou des cartes de mémorisation (LLS.fr/ESTFM) 12

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Les fiches méthodes du manuel d'Enseignement scientifique terminale ont été pensées pour être innovantes et sortir des sentiers battus. Elles visent avant tout l'amélioration de l'esprit critique et scientifique des élèves.
Un travail de compétences plus usuelles et transversales est ensuite proposé, avant une approche historique sous forme de frises permettant d'appréhender rapidement et visuellement l'évolution des idées dans un domaine donné.

Document sous licence libre Creative Commons

Esprit critique et scientifique

Fiche méthode 2 : Différencier savoir, opinion et savoir (p. 271)

Comment utiliser cette fiche méthode ?
Cette fiche méthode peut être utile pour introduire une activité axée autour du premier point des objectifs généraux du préambule : « comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration ».
Pour travailler cet objectif, on peut s'appuyer sur les encadrés « Histoire, enjeux et débats » du programme. Il peut être intéressant de s'associer à l'enseignant(e) de philosophie pour travailler cette partie.

Objectif méthodologique :

- Associer l'acquisition des savoirs et savoir-faire à la compréhension de leur nature et de leur construction.

Présentation des documents

Document : Platon et Socrate dans un détail du tableau de Raphaël, *L'école d'Athènes*
Le débat entre savoir, opinion et croyance est en fait un débat antique ! Voici un extrait d'un texte de Platon, dans *Le Gorgias* (*De la rhétorique*) vers -390.

SOCRATE : Alors continuons et examinons encore ceci. Y a-t-il quelque chose que tu appelles savoir ?
GORGIAS : Oui.
S. : Et quelque chose que tu appelles croire ?
G. : Certainement.
S. : Te semble-t-il que savoir et croire, la science et la croyance, soient choses identiques et différentes ?
G. : Pour moi, Socrate, je les tiens pour différentes.
S. : Tu as raison, et je vais t'en donner la preuve. Si l'on te demandait : « Y a-t-il, Gorgias, une croyance fausse et une vraie ? » tu dirais oui, je suppose.
G. : Oui.
S. : Mais y a-t-il de même une science fausse et une vraie ?
G. : Pas du tout.
S. : Il est donc évident que savoir et croire ne sont pas la même chose.
G. : C'est juste.
S. : Cependant ceux qui croient sont persuadés aussi bien que ceux qui savent.

Citation d'Aristote : « L'ignorant affirme, le savant doute, le sage réfléchit. »

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- Le livre de Guillaume Lecointre, *Savoirs, opinions et croyances*, en particulier le chapitre 1.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Fiche méthode 3 : Apprécier la fiabilité d'une information sur Internet et savoir détecter les infox (p. 272-273)

Comment utiliser cette fiche méthode ?
Cette fiche méthode sera utile chaque fois que l'élève sera amené à réaliser une recherche sur Internet. Elle peut aussi servir de base à un travail sur les fausses informations. Mais elle peut aussi être utilisée en-dehors du cadre de la classe, l'objectif final étant que, lorsque l'élève sera familiarisé avec ce mode de vérification, il pourra avoir le réflexe de l'utiliser pour clarifier une information douteuse.

Objectifs méthodologiques :

- Contribuer au développement en chaque élève d'un esprit rationnel, autonome et éclairé. Être capable d'exercer une analyse critique face aux fausses informations et aux rumeurs.

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- *Pour la Science*, hors-série n°98, février-mars 2018 : « Big Data, vers une révolution de l'intelligence ? ». Dans ce numéro, on trouve un article très intéressant sur les *fake news* et l'explication de leur succès.
- Jeu « bulle infinie » sur le site de l'académie de Créteil : http://svt.ac-creteil.fr/?Logiciel-BULLE-INFINIE-pour-debattre-en-sciences
- Quelques sites de *fact checking* :
  - https://www.lemonde.fr/verification/
  - https://www.hoaxbuster.com/
  - https://factuel.afp.com/
  - https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/

Document sous licence libre Creative Commons

Fiche méthode 4 : Reconnaître et interpréter une relation de corrélation (p. 274-275)

Comment utiliser cette fiche méthode ?
La différence entre corrélation et causalité est une frontière difficile à marquer, facile à franchir, et même des chercheurs professionnels peuvent s'y tromper. Cette fiche, assez complexe, en expose en détail les justifications mathématiques. Il sera sans doute plus parlant de commencer par les exemples « absurdes » de corrélations proposés en lien numérique, pour provoquer la réflexion (LLS.fr/ESTcorrelations).

Objectifs méthodologiques :
- Rendre intelligible le monde en déchiffrant la réalité complexe, dont [l'élève] extrait des éléments qu'il analyse et dont il élucide les interactions.
- Consolider des compétences [...] de raisonnement logique et de représentation et exercer un esprit critique en interrogeant les résultats d'un modèle mathématique.

Présentation des documents

Graphique n° 1 : relation entre le nombre d'enfants prénommés « Gaël » entre 2007 et 2017 et leur département de naissance
Ce graphique est un exemple de cas où, bien que la représentation graphique d'une série de données en fonction d'une autre soit possible, la relation mathématique entre les abscisses et les ordonnées n'a aucun sens. On pourra illustrer cela en montrant que, si on remplace le numéro de département par son nom, le graphique est le même, mais on ne peut effectuer aucun calcul avec un nom de département. On montrera encore qu'il n'y a pas de prédiction possible d'une donnée à partir d'une autre : par exemple, en donnant un nombre d'enfants (40), on ne peut pas déterminer, même approximativement, d'où il vient (plusieurs départements correspondent). De même, le fait de connaître l'effectif de « Gaël » des départements 1 à 12 ne permet en aucun cas de prédire le résultat du n°13 (les Bouches-du-Rhône).

Graphique n° 2 : relation entre fécondité et PIB
Ce graphique montre un exemple de corrélation claire, alors que la causalité, elle, est moins évidente. Ici, on pourra mettre en avant l'aspect prédictif : en donnant le PIB d'un pays, on peut proposer une fourchette pour la natalité, et inversement. Bien entendu, certains pays échappent à la règle (des pays pauvres ayant une natalité basse par exemple), cette prédiction est donc imparfaite. On en vient à l'idée que c'est une corrélation faible, peu informative, d'où la valeur peu élevée du coefficient de corrélation. La forme même de la relation est sujette à caution.
On peut aussi souligner que, bien que la corrélation existe, le lien de cause à effet n'est pas évident : pourquoi les pays riches ont-ils une natalité plus faible ? Il existe des facteurs sociologiques, politiques, etc.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Graphique n°3 : relation entre mortalité infantile et PIB

Ce graphique illustre à la fois une corrélation plus robuste (coefficient de 0,78) et une causalité plus évidente : le facteur explicatif est la qualité du système de santé, découlant directement du PIB, et affectant directement la mortalité infantile. On peut ici montrer que, mathématiquement, la mortalité infantile permet de « prédire » le PIB (« dis-moi la mortalité de ton pays et je te dirai quel PIB il doit avoir ») et inversement. Mais d'un point de vue logique, il n'en est pas de même : la causalité va dans le sens « pays riche » *a pour conséquence* « bon système de santé » *a pour conséquence* « taux de mortalité faible ». Elle ne fonctionne pas dans l'autre sens (la diminution du taux de mortalité est une bonne chose, un indice de bon développement du pays, mais ne crée pas de richesse). Ce graphique illustre donc une relation de causalité, qui ne se déduit pas directement du modèle mathématique, mais d'une bonne connaissance du sujet traité. Elle ne peut pas se démontrer facilement à partir des données.

Graphique n°4 : relation entre production de glaces aux États-Unis et morts par noyade dans des piscines

Il s'agit ici d'un des nombreux exemples possibles de fausses corrélations. Il paraît évident d'un point de vue logique que manger de la glace n'augmente pas les chances de se noyer, pas plus que les noyés ne mangent de glaces. Mais d'un point de vue mathématique, la corrélation ne se distingue pas de celle de l'exemple précédent. Dans ce cas, la « variable de confusion » qui est responsable de cette corrélation est même identifiée : il s'agit de la température. On peut proposer de tracer un graphique entre la température moyenne du mois (sur un site de météo) et la consommation de glaces d'une part, entre la température moyenne du mois et la nombre de noyades d'autre part : on obtient deux graphiques montrant une corrélation et, cette fois, une causalité.

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- https://www.thoughtco.com/correlation-and-causation-in-statistics-3126340 :
  les explications sont en anglais, mais l'article est clair et compréhensible. Sur ce site, on peut trouver d'autres articles courts dans le domaine des statistiques.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Fiche méthode 6 : Identifier les différents biais cognitifs (LLS.fr/ESTFM)

Comment utiliser cette fiche méthode ?
Cette fiche n'a pas vocation à être utilisée lors d'une activité précise, mais a pour but de répertorier des biais qui peuvent être vécus par les élèves. Si vous en identifiez un lors d'une discussion sur les fausses informations ou des sujets sensibles, vous pouvez renvoyer l'élève à cette fiche. Autant que possible, les expressions sont celles utilisées dans le monde de la recherche, ou leur traduction de l'anglais. Il est donc possible de demander aux élèves de faire des recherches plus détaillées sur ces notions en vue d'un exposé en classe.

Objectifs méthodologiques :

- Faire comprendre à chacun en quoi la culture scientifique est aujourd'hui indispensable pour saisir l'évolution des sociétés.
- Comprendre que le savoir scientifique résulte d'une construction rationnelle. Il se distingue d'une croyance ou d'une opinion. Il cherche à expliquer la réalité par des causes matérielles.

Détails et exemples pour chacune des rubriques :

BIAIS LOGIQUES

Si les bases de la logique étaient déjà connues par Aristote ou Platon, force est de constater que l'humanité, finalement, retombe toujours dans les mêmes erreurs.

- **Sophismes :**

L'affirmation « L'eau est liquide à 10 °C, or l'alcool est liquide à cette température, donc l'alcool est de l'eau. » appartient à la catégorie des sophismes, des raisonnements qui semblent logiques mais s'avèrent faux. Ce type de raisonnement, difficile à démasquer, car il reprend les codes de la démonstration scientifique, conduit par exemple à utiliser des résultats issus d'une étude donnée et à les appliquer à un autre cas. Il est fréquent dans les démonstrations pseudo-scientifiques de sites complotistes. Pour le déconstruire, il faut montrer que les différentes affirmations (notamment la 1re et la 2de) ne s'appliquent pas dans le même cadre (« l'eau est liquide à 10°C » est une propriété particulière de l'eau, elle n'en est pas une caractéristique propre, on ne peut pas dire « SEULE l'eau est liquide à 10°C »).

- **Démonstration de l'absence :**

Quel est le point commun entre le débat sur les OGM, celui sur le créationnisme ou les élucubrations sur la zone 51 ? Celui d'une démonstration impossible : la non-existence. « L'absence de preuve n'est pas une preuve de l'absence » disent les logiciens. En d'autres termes, si l'existence d'un seul contre-exemple suffit pour contrer l'affirmation « Les OGM sont inoffensifs », en revanche, il est impossible de réfuter l'affirmation : « les OGM ne présentent aucun danger », car cela reviendrait à envisager une infinité de situations. De même, on ne peut pas prouver la non-existence de Dieu, ou l'absence d'extraterrestres dans la zone 51. Il convient d'attirer l'attention sur le fait que, une telle démonstration étant impossible à produire en toute logique, on ne peut accuser des scientifiques d'être « incapables » de produire une « preuve ». Il faut alors montrer que l'on part de l'hypothèse nulle : « il n'y a pas

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

d'extraterrestres », et que l'on attend d'un scientifique qu'il démontre qu'elle est fausse. Tant qu'il ne l'a pas fait, l'hypothèse nulle reste la plus probable. Cela n'invalide pas les croyances, mais ce type de raisonnement exclut qu'elles puissent reposer sur des bases scientifiques.

- **Effet de succession (*Post hoc ergo propter hoc*)**

La prise d'un médicament (souvent, au paroxysme d'une maladie, quand l'amélioration est proche), suivie d'une rémission, nous mène à penser que le remède a fonctionné. Mais les études scientifiques doivent se fonder sur la répétition, la reproductibilité d'un phénomène pour pouvoir affirmer que, le résultat ayant été le même sur les *n* premiers cas, il est probable qu'il le sera pour le cas *n* + 1. Sans rentrer dans les détails statistiques, on peut expliquer que cette probabilité est d'autant plus forte que l'échantillon est grand et que le résultat est répété un grand nombre de fois (écart-type faible). Pour un échantillon d'une personne, la probabilité que la rémission vienne du médicament est très faible - cela revient à jouer sa santé à pile ou face !

- **Effet cigogne (*Cum hoc ergo propter hoc*)**

D'après une légende alsacienne, les localités où l'on voit plus de nids de cigogne sont aussi celles où il y a davantage de naissances. La corrélation est mise en évidence au XIXe siècle, mais y a-t-il pour autant causalité ? Pas du tout : les cigognes préfèrent simplement les communes plus petites, donc rurales, et la natalité y est plus forte, en tout cas au XIXe, pour différentes raisons sociologiques (milieu agricole ayant besoin de « bras », tabou sur la contraception, etc).

EFFETS DE GROUPE

L'humain est un être social, qui évolue dans des groupes structurés par un discours ou des récits communs. Les réseaux sociaux n'ont pas fondamentalement changé la donne, mais, curieusement, semblent avoir offert à ces récits une caisse de résonance sans égal.

- **Biais de confiance**

Malgré la « rationalisation » croissante du monde et le recours à des méthodes scientifiques dans la plupart des domaines, on constate que des légendes urbaines littéralement incroyables naissent et sont prises au sérieux par de nombreuses personnes. Paradoxe ? En effet, mais il témoigne d'une crise de confiance : une personne déçue par une institution a tendance à généraliser à tous les organes « officiels » et à accorder sa confiance à des sources qualifiées « d'alternatives », autrement dit, qui s'opposent aux institutions, parmi lesquelles bon nombre de charlatans.

- **Biais de confirmation**

Le plus célèbre des biais par lesquels les « infox » et théories du complot s'insinuent dans notre monde est le biais de confirmation. Pour faire simple, nous accordons davantage de confiance à une information que vient confirmer notre schéma de pensée dominant qu'à une information qui vient le contredire. Et bien entendu, nous relayons cette information. Par ailleurs, le fonctionnement même des réseaux sociaux renforce ce mécanisme, en ne présentant que des contenus ayant trait à nos sujets favoris, ou en suggérant des « amis » ou des pages partageant ce genre de contenus. On assiste ainsi à une spectaculaire création de « bulles » virtuelles à l'intérieur desquelles les individus se confortent les uns les autres et n'ont plus accès aux informations contradictoires.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

- **Effet placebo, nocebo et psychosomatiques**

En 2009, quelques riverains de la commune de Saint-Cloud s'alarmèrent de la construction d'antennes-relais près des habitations. Bientôt, comme l'avaient prédit ces « lanceurs d'alerte », de nombreux habitants ressentirent nausées, vertiges, etc. Jusqu'à ce que l'on réalise que les antennes n'avaient jamais été mises en service et n'émettaient aucune onde. Pendant négatif de l'effet placebo, l'effet nocebo montre à quel point nous sommes sensibles aux discours alarmistes, jusqu'à en ressentir physiquement les effets.

RÉFLEXES HÉRITÉS DU NÉOLITHIQUE

Notre cerveau est un outil extraordinaire. Son petit défaut ? Il est surtout « câblé » pour répondre aux défis d'un environnement de type Paléolithique ou Néolithique. Rappelons en effet que la période « historique » de l'histoire d'*Homo sapiens* n'en représente que moins de 0,2 %, et que l'essentiel de la sélection naturelle dont nous sommes les héritiers/ères s'est effectuée en amont.

- **Biais d'ancrage ou effet de primauté**

Quelle est l'information la plus importante sur un objet donné ? Celle que nous avons captée dans les premières secondes. Les détails recueillis après sont de peu d'importance, il faut aller vite pour survivre ! La conséquence est que nous nous fions davantage à ce que nous avons appris en premier : en 1940, le psychologue Solomon Ash montre ainsi que si l'on vous présente Steve comme étant un garçon « intelligent, travailleur, sanguin, critique, têtu et envieux », vous aurez une meilleure opinion de lui que si on vous le décrit comme « envieux, têtu, critique, sanguin, travailleur et intelligent ». Or, les moteurs de recherche ne classent pas l'information en fonction de sa pertinence, mais de sa popularité, voire de la somme payée par le détenteur de l'information. Et les publicitaires sont passés maîtres dans l'art du « message à retenir ».

- **Biais d'attention**

Dans un monde saturé d'informations, le « temps de cerveau disponible » tend à être de plus en plus réduit. Or, le cerveau réagit davantage à ce qui est nouveau (encore une règle de survie), ou à ce qui provoque une forte émotion. Certains « youtubers » jouent sur ce réflexe en se livrant à une surenchère d'absurdités ou de mises en scènes destinées à capter l'attention, comme ce jeune Britannique qui s'était cimenté la tête dans un micro-ondes et a failli y laisser la vie, dans l'espoir de rassembler plus d'abonnés sur sa chaîne.

- **Hiérarchisation des dangers**

Savoir à quelle sollicitation réagir en premier – un tigre à dents de sabre ou une branche agitée par le vent – peut vous sauver la vie : c'est la hiérarchisation de valeurs. Or, on peut montrer que plus les sollicitations sont nombreuses, plus elles retiennent l'attention, mais moins l'on est porté à y réagir. Des chercheurs ont installé dans une épicerie de luxe deux stands. Le premier propose 24 variétés exotiques de confiture tandis que le second n'en propose que 6. On constate alors que le stand le mieux garni retient plus facilement l'attention (60 % contre 40 %), mais il suscite moins d'actes d'achat. Lorsque 24 confitures sont présentées, seuls 3 % de l'ensemble des clients en achètent un pot de plus que prévu. En revanche, si le choix est réduit à 6, le chiffre grimpe à 30 %.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

C'est une explication au fait que nous restions passifs devant le désastre écologique, la situation politique, les scandales financiers, les crises sanitaires qui se préparent.

UN AUTRE BIAIS À TRAVAILLER : LA DIFFICILE ÉVALUATION DU TEMPS

Terminons avec un effet que l'économiste Paul Samuelson a identifié comme étant la « dépréciation temporelle de la valeur ». Un bien proche dans le temps nous paraît avoir bien plus de valeur qu'un bien éloigné, quand bien même la valeur objective de ce dernier serait supérieure. À quoi bon se soucier de l'avenir lorsqu'on peut mourir à tout moment et que la Terre paraît immuable ? C'est ce qui conduit à céder à la pulsion du moment en écrivant un tweet vengeur qui ruinera sa carrière plus tard ; ou à produire le plus possible sans se soucier des récoltes futures.

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- *Pour la Science,* n°472, février 2017 : « Désinformation : ce que révèlent les réseaux sociaux ». Un article qui explore en détail le biais de confirmation et la création de bulles d'information hermétiques les unes aux autres.
- La plupart des explications et exemples qui ne sont pas traités dans cet article sont issus des chroniques de Gérald Bronner (professeur de sociologie à l'Université Paris Diderot) et de Gilles Dowek (chercheur à L'INRIA) : « Cabinet de curiosités sociologiques » et « *Homo sapiens informaticus* », dans le magazine *Pour la Science*, plus détaillés et très instructifs. On les retrouvera en utilisant l'outil de recherche du site *Pour la Science*.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Améliorer ses compétences

Fiche méthode 9 : Préparer et réaliser une présentation orale (p. 277)

Comment utiliser cette fiche méthode ?
Dans l'objectif de préparer le grand oral de terminale, il peut être intéressant de travailler l'oral à différents moments de l'année avec les élèves. Cela permet aussi de les évaluer de manière différente, à travers des compétences qu'ils ont peu l'habitude de mettre en œuvre. Préparer une présentation orale permet d'ailleurs souvent d'utiliser des outils numériques et donc de travailler les compétences numériques (voir certification PIX).

Objectifs méthodologiques :
- Développement de compétences langagières orales.
- Pratique de l'argumentation.
- Coopérer et collaborer dans une démarche de projet.

Présentation des documents

Cette fiche ne regroupe que quelques conseils qui peuvent être étoffés en fonction des premiers oraux de vos élèves. Ils ont souvent un bon regard critique et il peut être intéressant de les laisser trouver les défauts et qualités de leurs oraux (voire se filmer pour faire un premier repérage « personnel »)

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :
- Des ressources officielles sur le travail de l'oral : http://quandjepasselebac.education.fr/comment-se-passe-le-grand-oral/
- Une séquence Eduscol sur le travail de l'oral avec les élèves : https://cache.media.eduscol.education.fr/file/Accompagnement_personnalise/71/4/AP_s_exprimer_a_oral_282714.pdf

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Fiche méthode 13 : Préparer une fiche ou des cartes de mémorisation (LLS.fr/ESTFM)

Comment utiliser cette fiche méthode ?

L'intérêt des cartes de mémorisation est leur facilité d'utilisation, de même que le fait qu'elles soient courtes et éventuellement ludiques avec l'utilisation d'outils numériques. Elles permettent aussi un réel questionnement pour le cerveau et un feed-back rapide.

On peut bien sûr envisager que les élèves réalisent seuls ces cartes ou fiches de mémorisation, mais, par expérience, très peu le font, et au vu du volume horaire dédié à l'Enseignement scientifique, cela semble peu réalisable.

Il revient donc à l'enseignant de réaliser ces fiches de mémorisation et/ou de créer les cartes de mémorisation. Une version simple est la version avec question à gauche et réponse à droite : facile à créer, facile à utiliser.

De nombreux logiciels existent pour créer des cartes de mémorisation :

- le plus couramment utilisé est ANKI (« mémoire » en japonais), mais l'application, gratuite sur ordinateur et sous Android, est payante (et chère) pour les utilisateurs d'Iphone.
- une autre application gratuite : Mémoflash. Simple et facile d'utilisation.

Objectifs méthodologiques :

- Rappeler le statut nécessaire et essentiel de l'erreur dans les processus d'apprentissage.
- Acquérir les savoirs exigibles du programme.

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- https://sciences-cognitives.fr/le-parcours-formation/memorisation/ : un ensemble de diaporama et documents très intéressant sur la mémorisation
- *Apprendre !* de Stanislas Dehaene chez Odile Jacob.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Objectif Bac Thème 1

Préparation aux épreuves communes de contrôle continu **2**

Sujet corrigé 1 : Impact écologique des régimes alimentaires (p. 84-85) 2

Sujet 2 avec coups de pouce : La mise en place de la couche d'ozone et ses conséquences (p. 86-87) 3

Sujet numérique avec coups de pouce : Particules fines et effets sur la santé humaine 5

Sujet 3 pour s'entraîner : Activité solaire et changement climatique (p. 88-89) 8

Sujet numérique pour s'entraîner : Une hypothèse pour expliquer le Petit Âge glaciaire 11

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Préparation aux épreuves communes de contrôle continu

Sujet corrigé 1 : Impact écologique des régimes alimentaires (p. 84-85)

Présentation

Cet exercice s'inscrit dans le thème 1, partie 4 « Énergie, choix de développement et futur climatique ». Il permet de manipuler la notion d'empreinte carbone en questionnant les émissions indirectes liées à l'alimentation, qui représentent près d'un cinquième de nos émissions et sur lesquelles l'élève de terminale peut avoir une prise dans sa vie quotidienne. Il permet par des calculs simples, en utilisant des données statistiques, de comparer les émissions indirectes de différents régimes alimentaire et de les comparer avec celles d'un objet bien connu pour ses émissions : la voiture. L'élève devra être attentif aux unités employées, aux arrondis, et devra faire preuve d'esprit critique. Il mobilisera les notions d'équivalent CO_2, d'empreinte carbone, de cycle de vie.

Réponses détaillées :

La résolution est disponible sur le manuel élève p. 85.

Coups de pouce différenciés supplémentaires :

- Question 2 : Relever la teneur en protéine de 100 g de bœuf. Relever la masse de protéines recommandée pour un homme ou pour une femme. En déduire combien de grammes de viande représente cette masse de protéines recommandée
- Question 3 : Relever dans le doc. 1 les émissions de CO_2 que représente 1 kg de viande de bœuf. En déduire la masse d'équivalent CO_2 émise par la quantité de bœuf déterminée à la question 2. Attention aux unités.
- Question 6 : Déterminez les émissions de CO_2 que représente la consommation de bœuf assurant les apports en protéines d'une journée (utiliser la réponse à la question 3) il s'agit des seules émissions du cycliste. Pour déterminer les émissions de l'automobiliste, ajoutez les émissions liées au véhicule sur une journée (question 4) et les émissions liées à la consommation journalière de tofu (question 3).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sujet 2 avec coups de pouce : La mise en place de la couche d'ozone et ses conséquences (p. 86-87)

Présentation

Ce sujet est en lien avec la partie du thème 1 « L'atmosphère et la vie ». Il a pour but de mettre en relation les notions sur l'apparition du dioxygène dans l'atmosphère, la formation de la couche d'ozone et l'apparition de la vie dans différentes conditions. Cet exercice permet également de remobiliser des notions de seconde concernant l'ADN, ainsi qu'un savoir-faire d'Enseignement scientifique de terminale qui consiste à interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet.
Ce sujet met en pratique des compétences transversales du pôle scientifique.

Réponses détaillées :

1. **Expliquer comment se forme l'ozone de la haute atmosphère et à quelle altitude sa concentration est maximale.**
L'ozone de la haute atmosphère se forme par dissociation de l'O_2 atmosphérique sous l'effet du rayonnement UV solaire. Sa concentration est maximale à environ 30 km d'altitude.

2. **Doc. 2 Décrire le spectre d'absorption de l'ozone dans le domaine des UV, du visible et de l'infrarouge.**
À partir du spectre d'absorption de l'ozone à différentes longueurs d'onde, on remarque que celui-ci absorbe à 100 % les UV les plus énergétiques. L'ozone absorbe peu les radiations du visible, avec un seul pic d'absorption au niveau des longueurs d'ondes rouges. Enfin, l'ozone présente trois pics d'absorption pour des longueurs d'onde précises dans l'infrarouge lointain, autour de 10 000 nm.
Précision pour les unités : l'absorbance est la mesure de la quantité de lumière qui est absorbée lorsqu'elle passe à travers une substance.

3. **Doc.1 et 3 Indiquer à quelle longueur d'onde se situe le maximum d'absorption de l'ADN et à quel domaine des UV, du visible ou de l'infrarouge cela correspond.**
Le pic d'absorption de l'ADN est à 270 nm ce qui correspond aux UV.

4. **Doc.1 et 3 Expliquer l'importance de la couche d'ozone dans l'apparition de la vie terrestre.**
Tous les êtres vivants sont composés d'ADN qui peut être altéré par l'effet mutagène des rayons UV. Or, la couche d'ozone absorbe une grande partie de ces UV. Ainsi, ceux-ci sont filtrés et atteignent moins la surface de la Terre grâce à la couche d'ozone, ce qui a permis le développement de la vie en surface.

5. **Expliquer le rôle de la mélanine et dans quel domaine du visible, des infrarouges ou des ultraviolets elle est la plus efficace.**
La mélanine est responsable de la pigmentation naturelle de la peau, ainsi que du bronzage. Son absorption est plus efficace à environ 220 nm, donc dans le domaine des UV.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

6. A partir de votre réponse à la question précédente et du doc. 3, déduire comment l'espèce humaine fait face à des conditions d'ensoleillement fortes.
La mélanine a la capacité d'absorber les UV, ainsi, les cellules se trouvant sous la peau sont beaucoup moins atteintes. La production plus importante de mélanine dans l'espèce humaine lui permet de s'adapter aux conditions d'ensoleillement fortes.

7. Doc. 2 Justifier que la vie tait possible sur Terre avant l'apparition de la couche d'ozone dans des conditions particulières que vous préciserez.
On remarque à l'aide du document 2 qu'à partir de quelques mètres de profondeur dans l'eau, les UV sont totalement absorbés. On en déduit donc que la vie était possible sous l'eau, puisque l'ADN a ainsi moins de risques d'être altéré par les UV.

8. L'ozone est une molécule formée de trois atomes d'oxygène (O_3). À l'aide de vos connaissances, expliquer pourquoi cette couche a pu commencer à se former il y a 2,4 milliards d'années.
La couche d'ozone, faite d'oxygène (O_3), a pu commencer à se former il y a 2,4 milliards d'années car c'est à ce moment que le dioxygène a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère, suite à l'apparition de la photosynthèse, une réaction chimique du métabolisme de certains êtres vivants, comme les stromatolithes.

9. Expliquer pourquoi une vie à l'air libre a pu se développer seulement après 2,4 milliards d'années.
Une vie à l'air libre a pu se développer après 2,4 milliards d'années lorsqu'il y a eu assez de O_2 produit par photosynthèse dans l'atmosphère pour former la couche d'ozone, et ainsi protéger du rayonnement UV l'ADN des êtres vivants à l'air libre.

Coups de pouce différenciés supplémentaires :

- Rappel à propos du spectre d'absorption : c'est une courbe représentant la quantité d'énergie absorbée par un composé en fonction de la longueur d'onde.
- Aide à l'analyse du document 2 : la courbe correspond à la profondeur à laquelle disparaissent les différentes longueurs d'ondes. En dépassant cette courbe, à une certaine profondeur, la longueur d'onde associée n'est plus présente. Par exemple, la longueur d'onde qui correspond au rouge n'est plus présente à partir de 5 m de profondeur.
- Les cyanobactéries sont des organismes photosynthétiques qui sont apparus il y a environ 2,5 à 3 milliards d'années et qui peuvent former des stromatolites dans les eaux peu profondes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sujet numérique avec coups de pouce : Particules fines et effets sur la santé humaine

Présentation

Ce sujet est en lien avec la partie du thème 1 « Énergie, choix de développement et futur climatique » (chapitre 4). Il a pour but d'étudier la consommation et la production énergétique par pays et d'expliquer les facteurs d'émission de $PM_{2.5}$ à différentes échelles, ainsi que leurs effets sur la santé. Il permet également d'utiliser des compétences travaillées sur l'année en Enseignement Scientifique de terminale, comme l'utilisation des différentes unités d'énergie employées (t.e.p.) et leur conversion en joule. On pourra aussi exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles (mondiale et nationale), identifier et expliquer les conséquences sur la santé des particules fines résultant de combustions.
Ce sujet met en pratique des compétences transversales du pôle scientifique.

Réponses détaillées :

1. Convertir en joule la consommation et la production énergétique du pays le plus consommateur et le plus producteur d'énergie.
Le pays le plus consommateur d'énergie en 2018 est la Chine avec :
$3\,164 \times 10^6 \times 42 = 13{,}3 \times 10^{10}$ GJ ou $13{,}3 \times 10^{19}$J.
Le pays le plus producteur d'énergie en 2018 est également la Chine avec :
$2\,534 \times 10^6 \times 42 = 10{,}6 \times 10^{10}$ GJ ou $10{,}6 \times 10^{19}$ J.

2. Calculer la différence en joule entre la consommation et la production du pays le plus énergivore en 2018. Sa production énergétique est-elle suffisante pour satisfaire sa propre utilisation ? Comment ce pays peut-il satisfaire sa consommation énergétique ? Comparer avec les autres pays décrits dans le doc. 1.
La différence entre la consommation et la production de la Chine en 2018 est obtenue avec le calcul suivant : $13{,}3 \times 10^{19} - 10{,}6 \times 10^{18} = 2{,}7 \times 10^{19}$ J.
La Chine consomme donc $2{,}7 \times 10^{19}$ J de plus que ce qu'elle produit. Il s'agit donc d'un pays importateur d'énergie.
Les États-Unis, le Canada et le Brésil exportent de l'énergie, tout comme la Russie. En revanche, l'Inde importe de l'énergie, tout comme l'Italie, l'Allemagne, la France, le Japon et le Royaume-Uni.

3. Déterminer les zones les plus touchées par la pollution aux particules fines en France.
Les zones les plus touchées sont les grandes agglomérations, le Nord de la France et la vallée du Rhône.

4. Existe-t-il une relation entre le milieu de vie de la population et le nombre de décès attribuables aux $PM_{2,5}$? Justifier votre réponse en donnant des exemples.
On relève que dans toutes les régions françaises, il y a un pourcentage plus important de décès liés aux particules fines dans les très grosses agglomérations par rapport aux plus

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

petites villes ou aux zones rurales. En revanche, même s'il y a souvent plus de décès pour cause de pollution aux particules fines dans les petites agglomérations par rapport à la campagne (régions Nord-Pas de Calais et Bretagne), cette observation n'est pas systématique. Ainsi, la densité de la population semble être un facteur déterminant, mais pas le seul.
On peut penser par exemple, que la pollution peut être plus importante dans certaines zones rurales à cause du chauffage au bois, beaucoup plus émetteur de particules fines et plus courant en zone rurale.

5. Quels sont les pays où la mortalité liée aux particules fines est la plus importante ? Peut-on établir une corrélation avec les observations réalisées sur le doc. 1 ? De quelles autres données faut-il également tenir compte ?
L'Inde, la Chine, la Russie ou les Etats-Unis sont les pays où la mortalité liée aux particules fines est la plus importante, et ce sont en effet d'importants consommateurs d'énergie. Il semble exister une corrélation entre décès liés aux particules fines et consommation d'énergie.
Cependant, il faut rapporter ces nombres à la population totale des pays et à la densité de population très différente dans ces pays les uns par rapport aux autres.

6. En utilisant les données issues de plusieurs documents, proposer une explication à la différence de mortalité aux $PM_{2,5}$ entre les États-Unis et la Chine.
La Chine émet cinq fois plus de $PM_{2,5}$ que les États-Unis alors qu'elle ne consomme pas cinq fois plus d'énergie.
Les chinois consomment une part plus importante de charbon que les américains qui consomment davantage de pétrole. On peut également supposer que la combustion du charbon émet davantage de particules fines.

7. Donner des exemples d'autres substances qui peuvent affecter la qualité de l'air et donc la santé humaine.
L'ozone, le monoxyde de carbone, les NOx, les suies, les produits soufrés issus des combustions des carburants fossiles et de la biomasse sont autant de substances se trouvant dans l'air pouvant affecter la santé humaine.

Coups de pouce différenciés :

- Question 1 : Les Joules sont l'unité officielle de l'énergie, mais il existe des unités plus usuelles : Mt.e.p. signifie par exemple Mégatonne équivalent pétrole. Méga = 10^6. Attention aux chiffres significatifs : vérifier quel terme du produit comporte le moins de chiffres.
- Question 2 : On peut s'appuyer sur la réponse précédente pour le 1er consommateur. Il faut distinguer les cas des différents pays. Cela revient à indiquer si le pays importe l'énergie manquante ou en exporte. Si le pays n'est pas dans la liste des producteurs, c'est qu'il produit moins que le dernier producteur de la liste.
- Question 3 : Utiliser les localités et les grands repères géographiques.
- Question 4 : Une unité urbaine est définie par l'Insee comme une commune ou un ensemble de communes de plus de 2 000 habitants présentant une zone de bâti continu (correspond à une absence de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- Question 5 : Mettre en évidence des disparités entre pays.
- Question 6 : Attention, ici on compare des nombres de décès, et non plus des pourcentages, la taille de la population a une importance.
- Question 7 : En général, les combustibles les moins efficaces émettent plus de résidus de combustion et font donc partie les particules fines.

Document sous licence libre Creative Commons

Sujet 3 pour s'entraîner : Activité solaire et changement climatique (p. 88-89)

Présentation

Ce sujet, plus difficile que les autres, est en lien avec la partie du thème 1 sur « Le climat du futur » (chapitre 3). Il aborde une théorie du complot que l'on retrouve sur internet : l'activité solaire serait la cause naturelle majoritaire du changement climatique actuel. En montrant l'importance de la notion d'échelle de temps lors de l'étude des phénomènes climatiques, ce sujet mobilise l'esprit critique des élèves, utilise des savoir-faire mathématiques élémentaires et requiert la manipulation de grandeurs physiques usuelles de l'Enseignement scientifique de terminale, comme la puissance et la température. La résolution de ce sujet permet de démontrer que les facteurs forçants du système climatique varient en fonction de l'échelle de temps considérée, ce qui est sans nul doute un terreau favorable aux théories du complot associées au changement climatique, pour peu que l'exploitation des données scientifiques soit mal interprétée.
Ce sujet met en pratique des compétences transversales du pôle scientifique.

Réponses détaillées :

1. Calculer le pourcentage de variation de l'irradiance au cours d'un cycle solaire de onze ans.
D'après le **doc. 1**, l'irradiance est le flux d'énergie rayonnée par le Soleil, exprimé en $W \cdot m^{-2}$. Loin d'être constante, elle varie à différentes échelles : un cycle de 11 ans peut être repéré sur le **doc. 2**. Depuis 1980, l'irradiance a ainsi varié entre un minimum d'environ 1 360,5 et un maximum de 1 362,5 $W \cdot m^{-2}$ soit une amplitude d'environ 2 $W \cdot m^{-2}$. Le pourcentage de variation peut donc être estimé en posant le calcul $2 \times \frac{100}{1\ 362,5}$ soit environ 0,15 % de variation de l'irradiance au cours d'un cycle solaire de 11 ans.

2. Par la mise en relation des doc. 2 et 4, construire un paragraphe argumenté discutant des possibles conséquences climatiques des variations à différentes échelles de l'activité solaire
On peut identifier trois variations de l'activité solaire à différentes échelles.
D'après les **docs. 1 et 4**, on apprend que les éruptions solaires sont des perturbations rapides qui n'ont aucune conséquence sur le climat, mais plutôt sur des phénomènes célestes magnétiques locaux (aurores boréales) et sur la perturbation d'appareils électroniques spatiaux (satellites) ou terrestres.
La variation du nombre de taches solaires (visibles au **doc. 3**) avec une cyclicité de onze ans est à relier aux variations de l'irradiance, puis de l'insolation (**docs. 1 et 2**) qui peuvent avoir des répercussions sur la température de surface (amplitude maximale de 0,1 °C), sur la stratosphère (modification de l'intensité du vortex polaire arctique) et sur la possible formation des nuages (effets encore sujets à débat chez les scientifiques). On sait que la température de surface et les nuages sont des paramètres importants intervenant dans l'effet de serre naturel, donc sur la température moyenne de la Terre, et ainsi sur le climat à l'échelle

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

mondiale. Les modifications du vortex polaire pourraient avoir des conséquences mais locales dans l'hémisphère nord (arctique).
Enfin, d'après le **doc. 3**, la variabilité séculaire à millénaire, étudiée à partir de l'exemple du Petit Âge glaciaire en Europe, semble uniquement toucher des zones bien précises du globe sur des temps mal définis avec une amplitude faible inférieure à 0,2 °C. On peut donc difficilement parler de modifications globales du climat.
Pour conclure, la variabilité de l'activité solaire liée aux cycles de 11 ans semble, par son action sur la température de surface, être la seule à même de modifier le climat de manière globale. Reste à déterminer si l'amplitude de 0,1°C est significative ou négligeable.

3. Donner la définition de forçage radiatif.
Cf. lexique p. 286 : pour un système climatique, différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise. Un forçage radiatif positif représente donc une hausse de température.

4. Calculer le forçage radiatif total lié au transport aérien puis calculer alors la part qu'il représente dans le forçage radiatif total d'origine anthropique.
Le forçage radiatif total lié au transport aérien est de :
25,3 - 10,4 + 21,9 - 1 + 2 + 10 + 40 = 87,8 mW·m^{-2}
Le forçage radiatif total d'origine anthropique est lui de :
1 680 - 250 + 140 - 270 = 1 300 mW·m^{-2}.
Le forçage radiatif total lié au transport aérien représente donc $87,8 \times \frac{100}{1\ 300}$ soit environ 6,8 % du forçage radiatif total d'origine anthropique.

5. Comparer la valeur du forçage radiatif total lié au transport aérien et la valeur du forçage radiatif solaire correspondant à l'amplitude maximale d'irradiance.
La valeur du forçage radiatif total lié au transport aérien est de 87,8 mW·m^{-2}. Celle liée au forçage radiatif solaire, correspondant à l'amplitude maximale d'irradiance, est de 2 W·m^{-2} (**doc. 4**), soit un rapport entre les deux de $\frac{2\ 000}{87,8}$ soit environ 23.

6. Conclure sur le paramètre qui semble, d'après toutes ces données, le plus à même de changer le climat.
D'après les résultats aux questions précédentes, **à une échelle de 11 ans**, les variations de l'activité solaire (amplitude de 2 W·m^{-2} tous les 11 ans) semblent avoir un impact environ 23 fois plus important que le forçage radiatif lié au transport aérien à la même échelle. D'après les données qui nous sont fournies, à une échelle de 11 années uniquement, l'activité solaire semble donc plus à même de changer le climat.
Mais attention, il reste à déterminer ce qu'il en est sur une échelle de temps plus longue ! L'effet cumulatif du forçage radiatif d'origine anthropique ne devient-il pas plus important ? En effet, si l'irradiance varie de manière cyclique tous les 11 ans, force est de constater qu'on est loin d'observer la même cyclicité pour l'émission de gaz à effet de serre par les activités humaines à l'échelle mondiale depuis le début de l'ère industrielle.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Coups de pouce différenciés :

- Question 1 :
  - Retrouver la définition de l'irradiance dans le document 1, repérer l'unité associée à cette grandeur.
  - Identifier les cycles de l'activité solaire sur le document 2 et estimer la valeur en années d'un cycle.
  - Estimer la valeur maximale et minimale de l'irradiance au cours d'un cycle. En déduire l'amplitude de variation par une opération mathématique élémentaire.
  - Traduire cette amplitude en un pourcentage de variation en utilisant les règles de calculs vus en mathématiques dans une situation de proportionnalité.
- Question 2 :
  - Repérer dans les docs. 1 et 4 un phénomène qui varie sur un temps bref et qui n'a pas d'influence sur le climat.
  - Repérer dans les docs 1 à 3, un phénomène cyclique qui semble à même de modifier le climat global via l'effet de serre
  - Repérer dans le doc.3 un phénomène qui intervient sur un temps plus long et qui semble n'agir que de manière locale
- Question 3 : Aucune aide !
- Question 4 :
  - Réaliser la somme algébrique de toutes les activités intervenant dans le forçage radiatif total lié au transport aérien. Ne pas oublier l'unité !
  - Recommencer pour le forçage radiatif total d'origine anthropique. Ne pas oublier l'unité.
  - Calculer alors la part du forçage radiatif lié au transport aérien dans le forçage radiatif d'origine anthropique en utilisant les règles de calculs vus en mathématiques dans une situation de proportionnalité.
- Question 5 :
  - Rappeler l'amplitude de l'irradiance calculée à la question 1.
  - Réaliser le rapport entre la valeur du forçage radiatif lié au transport aérien et l'amplitude de l'irradiance (c'est une division).
- Question 6 :
  - Entre forçage radiatif total lié au transport aérien et irradiance, quel paramètre semble présenter la plus grosse valeur en $W \cdot m^{-2}$? En conclure sur le paramètre le plus à même de changer le climat à cette échelle.
  - En bilan, faire preuve d'esprit critique et s'interroger sur la possibilité de généraliser cette conclusion à d'autres échelles que celles de 11 années.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Sujet numérique pour s'entraîner : Une hypothèse pour expliquer le Petit Âge glaciaire

Présentation

Ce sujet est en lien avec la partie du thème 1 sur « L'atmosphère et la vie et sur la complexité du système climatique ». Il a pour but d'étudier une période climatique particulière, le Petit Âge glaciaire, et de faire le lien avec les notions étudiées en classe concernant le CO_2 et le principe de l'effet de serre. Il permet également d'utiliser des compétences développées au cours de l'année de terminale, comme l'analyse de la variation au cours du temps de certaines grandeurs et l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO_2. Il fait aussi intervenir la variation de température moyenne pour étudier l'évolution actuelle du climat. Pour réaliser l'exercice, il faudra interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (extension d'un glacier) et identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques.
Ce sujet met en pratique des compétences transversales du pôle scientifique.

Réponses détaillées :

1. Déterminer l'ordre de grandeur de la variation de température moyenne survenue dans l'hémisphère nord lors du Petit Âge glaciaire. Justifier le qualificatif de « Petit Âge glaciaire».
La variation de température est de l'ordre d'un demi degré Celsius. Cette période a ainsi été « petite » en intensité mais aussi en durée par rapport aux périodes glaciaires du quaternaire, qui durent plusieurs dizaines de milliers d'années.

2. Décrire les variations de la concentration en CO_2 atmosphérique pendant la durée du Petit Âge glaciaire.
Pendant la première partie du Petit Âge glaciaire, on n'observe pas de variation significative du taux de CO_2. Puis, de 1 500 à 1 700, on remarque une diminution significative du taux de CO_2 d'environ 10 ppm.

3. Présenter le rapport existant entre taux de CO_2 atmosphérique et la température globale. Indiquer le nom du phénomène impliqué.
Plus la concentration en CO_2 atmosphérique est importante, plus l'atmosphère absorbe le rayonnement infrarouge terrestre et le restitue, et enfin plus la Terre se réchauffe : c'est l'effet de serre. Le CO_2 est un gaz à effet de serre.

4. À partir de vos connaissances, rappeler les différents réservoirs de carbone présents sur Terre.
Les principaux réservoirs de carbone terrestre sont la biosphère (ensemble des organismes vivants), l'atmosphère, l'hydrosphère (océans), les sols et les roches.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

5. Proposer un flux de carbone pouvant expliquer l'observation réalisée sur le document 2, lors du Petit Age glaciaire.
Étant donné qu'une baisse de la concentration en CO_2 atmosphérique est observée, il faut un flux du cycle carbone qui prélève du CO_2 atmosphérique. Cela pourrait être par exemple la dissolution du CO_2 dans les océans, ou encore la photosynthèse des végétaux.

6. À partir du doc. 3, calculer la variation moyenne du glacier Grindelwald entre 1600 et 1800 puis entre 1800 et 2000. Conclure sur une conséquence du Petit Âge glaciaire.
La longueur moyenne du glacier Grindelwald n'a pas changée entre 1600 et 1850. Par contre, de 1850 à 2000 la longueur du glacier Grindelwald a diminuée de 1300 m. On observe une évolution similaire concernant les autres glaciers. La période 1600-1850 qui est incluse dans le Petit Âge glaciaire est donc marquée par une extension importante des glaciers alpins avec des variations de faible amplitude. La fin du Petit Âge glaciaire est caractérisée par un recul important des glaciers alpins.

7. À partir du doc. 4, décrire l'évolution du front du glacier Charquini Sur et montrer que le changement évoqué à la question précédente est d'échelle globale.
On observe que la moraine la plus ancienne (1686) est la plus avancée et que plus les moraines sont récentes, moins elles sont avancées. L'extension maximale des glaciers durant le Petit Âge glaciaire a donc également eu lieu dans l'hémisphère sud, il s'agit d'un événement d'échelle globale.

8. Citer les deux méthodes ici illustrées qui permettent de déterminer des climats passés et précisez-en une de plus.
Les deux méthodes utilisées ici sont l'étude des moraines formées par les glaciers pour déterminer leur emplacement, ainsi que l'analyse des taux de CO_2 présents dans des carottes de glace prélevées en Antarctique.
D'autres méthodes et outils existent pour reconstituer les climats du passé, comme la palynologie, l'études des coraux, des cernes des arbres, etc.

9. Citer d'autres exemples d'événements naturels pouvant causer des variations de la température et de la concentration en CO_2 atmosphérique.
Il existe d'autres évènements naturels pouvant être à l'origine de variations de température et de concentration en CO_2 atmosphérique, par exemple :

- les incendies de forêt sont à l'origine d'une libération importante de carbone de la biosphère vers l'atmosphère, elle-même à l'origine de l'augmentation de l'effet de serre et donc de la température (exemple des feux de forêt en Australie en début d'année 2020) ;
- le volcanisme est responsable de la libération d'une grande quantité de CO_2 dans l'atmosphère pouvant être à l'origine d'une augmentation de la température globale par le phénomène d'effet de serre.

10. Indiquer comment évolue la concentration en CO_2 et la température après 1900 et expliquer l'origine de ce phénomène.
Après 1900, il y a une augmentation importante et rapide de la concentration en CO_2 atmosphérique.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Ce phénomène est à mettre en lien avec l'industrialisation et l'utilisation des combustibles fossiles qui libère du CO_2 dans l'atmosphère, favorise l'effet de serre et provoque le réchauffement climatique aujourd'hui observé.

Ressource supplémentaire :

- Pour une origine volcanique du Petit Âge glaciaire : https://www.lefigaro.fr/environnement/2012/02/01/01029-20120201ARTFIG00280-les-mysteres-du-petit-age-glaciaire.php

Coups de pouce différenciés :

- Question 7 : Une moraine peut se mettre en place au front du glacier. La marque laissée par ce glacier permet donc de savoir jusqu'où le glacier a pu aller.
- Question 5 : Un flux de carbone est un transfert de carbone d'un réservoir à un autre.
- Question 6 : Identifier les valeurs au début et à la fin de la période étudiée afin de mettre en évidence la variation moyenne de longueur des glaciers. Ne pas tenir compte des variations de longueur sur quelques dizaines d'années. Les valeurs utilisées permettent une comparaison, la présence de valeurs négatives ne signifie pas que le glacier recule au-delà de son point de départ.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Thème 1 : Science, climat et société

Présentation **2**

Enjeux et débats **4**

Le climat du futur : un enjeu sociétal éclairé par la science (p. 10) 4

Focus : Les océans, un milieu fragile et menacé (p. 11) 6

Déconstruire les idées reçues **9**

« Il y a déjà eu des réchauffements climatiques similaires dans le passé ! » IDÉE REÇUE (p. 12) 9

« Le réchauffement climatique n'est pas d'origine humaine » IDÉE REÇUE (p. 13) 12

Un autre regard (p. 14-15) **15**

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Les pages d'ouverture du thème « Science, climat et société » ont été conçues dans le but d'apporter une vision transversale sur les différents chapitres et d'amener les élèves à réfléchir à l'enjeu de société majeur aujourd'hui qu'est le réchauffement climatique et à sa prise en compte par la communauté internationale.
Le parti pris a été également d'apporter des éléments de réflexion pour déconstruire des idées reçues et aiguiser l'esprit critique des élèves face aux informations que l'on trouve sur les réseaux sociaux et dans les médias d'une façon plus générale.
Les élèves n'étant pas tous scientifiques, ces pages permettent par ailleurs d'entrer dans le thème sous l'aspect sociétal plutôt que sous l'aspect purement scientifique : ainsi on suscitera plus aisément l'intérêt de tous les élèves en vue d'aborder les aspects plus techniques du thème.

Bibliographie :

- J-Y. Daniel et al., *Sciences de la Terre et de l'Univers*, édition De Boeck, 3e édition, septembre 2014.
- J-F. Deconinck, *Paléoclimats : L'enregistrement des variations climatiques,* édition Vuibert, Coll. LMD Sciences de la terre et de l'univers.
- J. Trichet, J. Gaillardet, M. Rotaru, M. Steinberg, *Les climats passés de la Terre*, édition Vuibert, février 2006.
- A. Foucault, *Climatologie et paléoclimatologie*, 2e édition, collection : Sciences Sup, Dunod, novembre 2016.

Sitographie :

Remarque : Ici sont regroupés des sites très généraux utilisables pour construire les cours et rechercher de la documentation fiable. D'autres sites beaucoup plus spécifique avec des articles précis seront proposés plus loin, lorsque les différents documents seront abordés afin d'étayer spécifiquement vos connaissances ou recherches sur les thèmes abordés dans les documents.

- http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques : Le site ACCES de l'ENS de Lyon est une mine d'or pour trouver des données fiables et riches sur l'ensemble des domaines des sciences de la vie et de la Terre. Il est régulièrement actualisé, avec des propositions d'activités. On peut notamment citer ce dossier thématique qui regroupe un ensemble extrêmement fourni de données sur le climat, son étude et le rôle de l'Homme dans son évolution :
  http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/simulation-des-conferences-des-parties-sur-le-changement-climatique/ressources-pedagogiques-et-questions-philosophiques
- https://planet-vie.ens.fr/ : Ce site, comme le précédent, contient de nombreux articles richement documentés pour la classe et pour la construction de cours. Ces informations sont classées par thématiques. Là encore, il est très régulièrement étayé de nouveautés. On peut notamment citer cette page où il est question de l'influence du climat sur les écosystèmes marins :
  https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/ecosystemes-marins-et-climat

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

- https://planet-terre.ens-lyon.fr/ : Encore un site de l'ENS de Lyon, toujours aussi intéressant et riche. Il est ici spécialisé dans les informations relatives aux sciences de la Terre. On peut ainsi y trouver notamment cet article, faisant une synthèse des connaissances sur le changement climatique :
  https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/GIEC-Seferian-2019.xml ;
  ou celui-ci traitant des variations climatiques au cours des temps géologiques :
  https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/variations-climatiques-bases.xml#sur150a
- http://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/etude-climats-passe-par-valerie-masson-delmotte : Un site intéressant présentant l'intérêt de l'étude des climats passés.
- http://leclimatchange.fr/ : Très bon site d'éclairage sur le 5e rapport du GIEC (éléments scientifiques apportés par le rapport, impacts du réchauffement climatique, atténuations possibles, questions-réponses à des climato-septiques).
- https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf :
  Le 5e rapport du GIEC (rapport de synthèse complet) traduit en français. Le rapport date de 2014 et est celui ayant servi de référence scientifique pour l'élaboration des accords de Paris.
- https://www.lsce.ipsl.fr/Phocea/Video/index.php?id=2 : Une vidéo extrêmement bien faite utilisable telle quelle en classe pour permettre aux élèves de comprendre la difficulté et la complexité de la modélisation climatique.
- http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/climat-environnement/webdoc-climat/interview-anais-orsi-glaces-polaires.aspx : Un témoignage d'une chercheuse en glaciologie qui, là encore, apporte une explication concrète et précise de ce qu'est l'étude des glaces polaires et sur son utilisation pour étudier le climat.
- https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/ : Des données actualisées sur les émissions de GES.
- http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CO2-emissions : Des données actualisées sur les émissions de CO_2 , mais aussi d'autres GES par pays et à l'échelle mondiale.
- https://data.giss.nasa.gov/gistemp/ : Site de la NASA recensant des données sur le climat à l'échelle mondiale.
- https://www.ipsl.fr : Site de l'Institut de recherche sur l'environnement, où on trouve de nombreuses données et des actualités, notamment sur le climat, mais pas seulement.
- https://www.oce.global : Des ressources à destinations des enseignants.

Puis quelques sites climato-sceptiques permettant d'avoir en tête les idées qu'ils véhiculent et les arguments qu'ils apportent pour éventuellement en discuter :

- https://www.dreuz.info/2017/06/10/article-14505174/
- https://www.dreuz.info/2019/07/13/une-etude-scientifique-finlandaise-conclut-que-le-giec-se-trompe-il-ny-a-pas-de-preuves-que-le-changement-climatique-est-du-a-lhomme/
- http://co2thetruth.e-monsite.com/pages/francais/resumons-comment-le-giec-s-est-discredite-par-ses-manipulations-politico-ecologiques.html
- https://www.climato-realistes.fr/juillet-2019-na-pas-ete-le-mois-le-plus-chaud-jamais-enregistre/

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Enjeux et débats

Le climat du futur : un enjeu sociétal éclairé par la science (p. 10)

Comment utiliser cette double-page avec les élèves ?
Cette double-page sert d'accroche pour entrer dans le thème et permettre aux élèves de se rendre compte de la place indispensable des recherches scientifiques dans les débats de société, en lien avec l'évolution climatique actuelle.
Il est alors possible d'introduire les différentes problématiques qui seront abordées dans les quatre chapitres de ce thème : notre atmosphère et son évolution, les éléments responsables du climat, l'évolution future du climat et le rôle des humains dans cette évolution, ainsi que la manière dont les scientifiques modélisent le climat futur.
De nombreuses ressources supplémentaires sont disponibles ici pour compléter ces quelques informations.

Lien avec le programme :
- Histoire, enjeux et débats :
  - Les enjeux du réchauffement climatique global.
  - Les acteurs des analyses climatiques : recherche et programmes mondiaux (Organisation Météorologique Mondiale, modèles climatiques) ; coordination (Nations-Unies) ; évaluation (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat).

Objectifs du programme travaillés :
- 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.

Objectifs méthodologiques :
- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation des documents

Document 1 : Des mobilisations citoyennes historiques
Ce document présente l'importance de la mobilisation citoyenne dans les débats de société. Il est aussi possible d'aborder les actions de la jeunesse pour se faire entendre, avec notamment les actions de Greta Thunberg et le mouvement « Youth for climate » (voir chapitre 3, p. 51).

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 2 : Des COP pour échanger et prendre des décisions
Les conférences des parties (COP, pour *Conference Of the Parties* en anglais) sont les moments forts, à l'échelle internationale, pour discuter des enjeux du réchauffement climatique et tenter de mettre d'accord les différentes nations sur une problématique globale. Le document montre aussi le rôle primordial du monde scientifique dans les prises de décisions politiques (GIEC).

Document 3 : Les accords de Paris sur le climat : un plan d'action pour le climat
Les accords de Paris sont le premier document signé par la totalité des pays présents lors des COP. Pour la première fois, les représentants de tous les pays sont d'accord sur le fait de mener une politique commune en matière de lutte contre le réchauffement climatique.
Ce document peut ainsi permettre de montrer la complexité de ce problème de société et la difficulté de se mettre d'accord au niveau international : il peut servir d'accroche pour parler de la sortie de ces accords par les États-Unis et des problématiques que cela pose. Si le temps le permet, les simulations de COP sont un excellent jeu de rôle à réaliser avec les élèves. De nombreuses ressources sont disponibles sur internet à ce sujet.

Document 4 : Le GIEC : des experts sur l'évolution du climat
Ce document permet aux élèves de comprendre d'où viennent les informations scientifiques servant aux prises de décisions internationales lors des COP. Il est important, pour déconstruire ensuite les idées reçues, que les élèves comprennent que le GIEC n'est pas un lobby, mais bien un groupe international de scientifiques spécialisés dans les recherches sur le climat, composé de chercheurs et chercheuses, d'organisations, d'universités, de laboratoires et venant de pays très différents.

D'autres ressources pour aller plus loin :

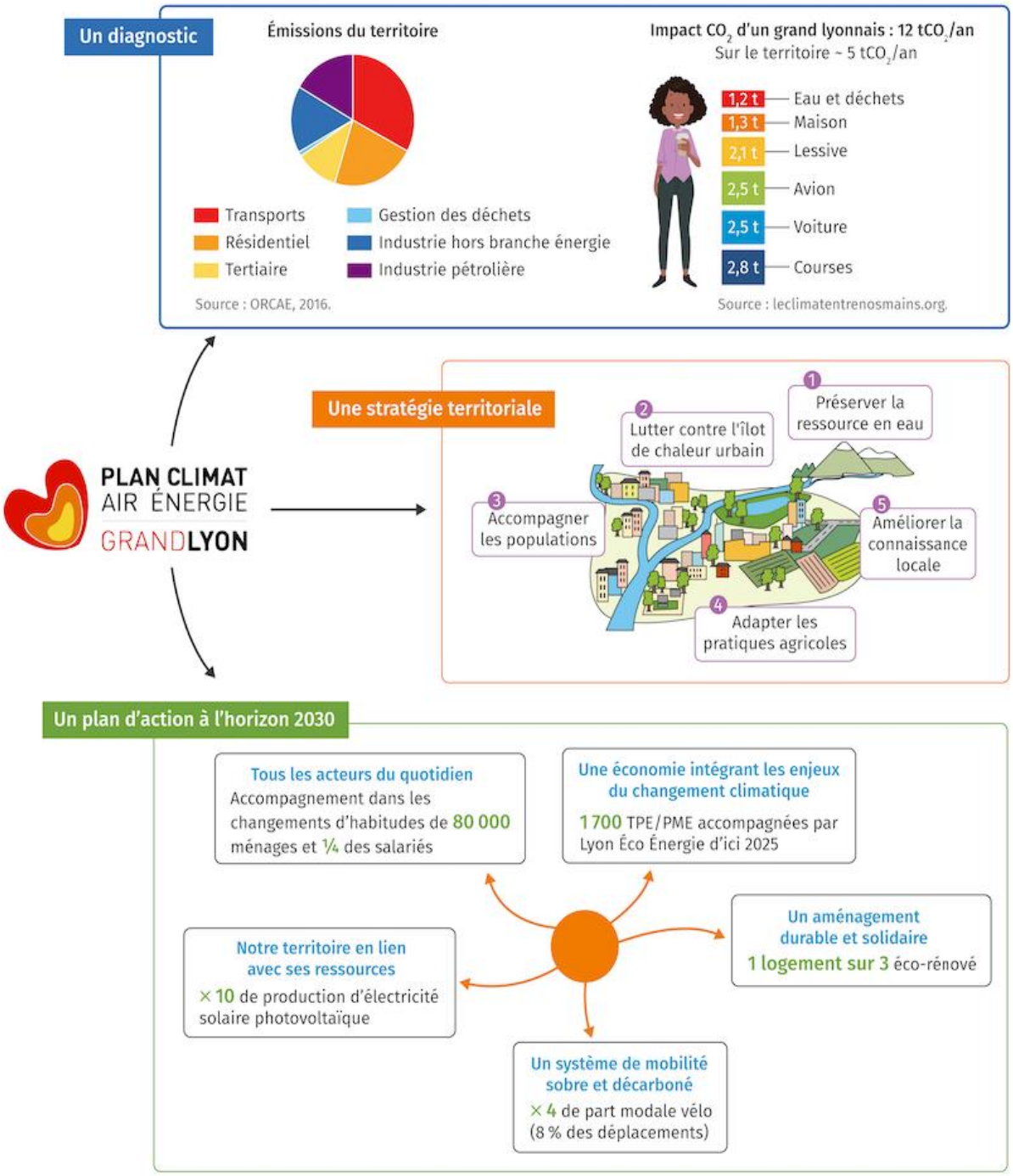
- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/travaux-du-giec : Un site pour comprendre plus précisément ce qu'est le GIEC et comment il élabore ses rapports.
- http://www.oce.global/sites/default/files/2019-04/1.5degree_FR_final_LR.pdf : Un résumé du rapport spécial du GIEC publié en 2018.
- https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/l-accord-de-paris/qu-est-ce-que-l-accord-de-paris : Site du groupe des Nations-Unies sur l'étude du changement climatique, présentant les accords de Paris signés lors de la COP21 en 2015.
- http://www.meteofrance.fr/actualites/75877772-ocean-et-cryosphere-que-faut-il-retenir-du-rapport-du-giec : Un article très intéressant décryptant le dernier rapport spécial du GIEC sorti en septembre 2019.

D'autres pistes d'enjeux et débats à aborder :

- Il est aussi possible d'aborder les actions locales sur le climat, beaucoup plus proches des élèves. C'est le cas des « Plan climat-air-énergie-territorial » (PCAET) : ce sont des documents regroupant l'ensemble des données territoriales (diagnostics, stratégies territoriales et plans d'actions) ayant pour but de limiter l'impact de l'agglomération sur le réchauffement climatique. Ces plans sont obligatoires pour toutes les agglomérations de plus de 20 000 habitants depuis le premier janvier 2019.

Document sous licence libre Creative Commons

Un exemple : le PCAET du Grand Lyon (agglomération d'environ 1,4 millions d'habitants, regroupant Lyon et une cinquantaine de communes limitrophes).



Source : https://blogs.grandlyon.com/plan-climat/le-plan-climat-du-grand-lyon/

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Focus : Les océans, un milieu fragile et menacé (p. 11)

Lien avec le programme :

- Histoire, enjeux et débats :
  - Un enjeu mondial : l'océan.
  - Les ressources et les utilisations de l'énergie dans le monde.
  - Le trou dans la couche d'ozone : de sa découverte à des prises de décisions mondiales.

Objectifs du programme travaillés :

- 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.

Objectifs méthodologiques :

- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation des documents

Document 1 : Risques marins liés au réchauffement climatique
Ce document permet de montrer l'impact du réchauffement climatique sur les océans, en prenant en compte deux scénarios : une augmentation de la température globale de 1,5 °C ou de 2 °C. Les données fournies proviennent d'un rapport du GIEC.

Document 2 : L'évolution des paramètres physico-chimiques des océans
Ce document montre l'évolution de la température des océans par rapport à la température moyenne enregistrée au cours du XXe siècle. Il permet de montrer que la température des océans a augmenté de près de 1 °C durant cette période. Il est à noter qu'il s'agit d'une température relative, par rapport à une température moyenne. Il est possible de compléter ces données par les modifications du pH des océans, accessibles en complément numérique (LLS.fr/ESTP58).

Document 3 : Les coraux, des exemples d'êtres vivants touchés par le réchauffement des océans
Ce document donne un exemple concret d'êtres vivants touchés par les modifications de la température des océans, les coraux, dont il est question dans le document 1. Il est également à mettre en lien avec le document 2, pour montrer les risques du réchauffement des océans.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

D'autres ressources pour aller plus loin :

- https://www.lemonde.fr/planete/article/2018/06/08/oceans-dix-chiffres-pour-resumer-les-enjeux-et-les-risques_5311528_3244.html : Très bon article permettant d'avoir des chiffres précis sur les enjeux sociétaux des océans et les risques qu'ils courent avec le réchauffement climatique.
- https://climatechangecurriculum.files.wordpress.com/2012/06/ocean-ph1.jpg : Carte d'évolution du pH.

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

- Les caractéristiques des coraux, ainsi que l'évolution du blanchiment des récifs coralliens présentés sous la forme de graphiques, pour montrer leur fragilité et leur vulnérabilité au réchauffement climatique (sujet de spé SVT Nouvelle Calédonie, Mars 2018) :
  http://svt.ac-besancon.fr/bac-s-mars-2018-nouvelle-caledonie/#spe
- L'importance du milieu océanique pour les activités et les sociétés humaines, pour montrer qu'il ne s'agit pas seulement d'un problème de biodiversité, mais aussi d'un problème de société touchant la vie économique :
  https://www.lemonde.fr/planete/article/2018/06/08/oceans-dix-chiffres-pour-resumer-les-enjeux-et-les-risques_5311528_3244.html
- Décryptage du dernier rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère, avec d'autres exemples de la conséquence du réchauffement climatiques sur les océans.
  http://www.meteofrance.fr/actualites/75877772-ocean-et-cryosphere-que-faut-il-retenir-du-rapport-du-giec

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Déconstruire les idées reçues

« Il y a déjà eu des réchauffements climatiques similaires dans le passé ! » IDÉE REÇUE (p. 12)

Comment utiliser cette double-page avec les élèves ?
Les deux consignes formalisées ont pour vocation d'aiguiser l'esprit critique des élèves et de déconstruire, en se basant sur des faits et un argumentaire scientifique, des idées climato-septiques.
Elle peut être envisagée de deux façons :

- comme une activité d'introduction permettant de montrer les connaissances qu'il sera nécessaire de construire et de développer pour avoir une réponse solidement argumentée, et qui seront abordées au cours de ce thème ;
- comme tâche complexe de fin de thème pour remobiliser les connaissances et les compétences travaillées dans cette partie du programme.

Elle peut également être l'occasion de travailler l'oral et la préparation au grand oral, par la restitution d'un travail enregistré par les élèves (avec les téléphones ou les ordinateurs) : l'argumentaire pouvant alors être destiné à répondre à des arguments climato-sceptiques, ou à justifier les paroles de Thomas Pesquet « il est irresponsable de sortir des accords de Paris ». Dans ce cas, les informations de la double-page « Débats et enjeux de sociétés » prennent toute leur place dans le travail argumentaire.

Lien avec le programme :

- Histoire, enjeux et débats :
  - Les enjeux du réchauffement climatique global.
  - Les acteurs des analyses climatiques : recherche et programmes mondiaux (Organisation Météorologique Mondiale, modèles climatiques) ; coordination (Nations-Unies) ; évaluation (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat).

Objectifs du programme travaillés :

- 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.

Objectifs méthodologiques :

- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

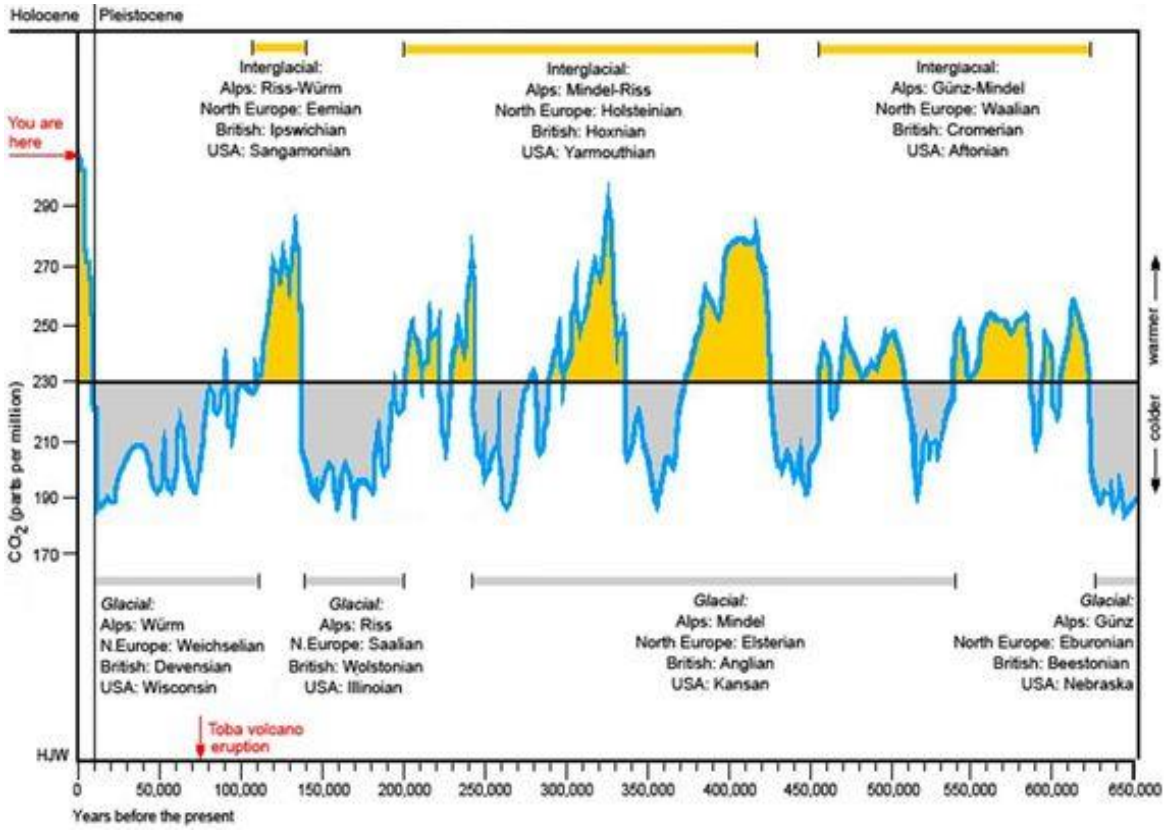
Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Présentation détaillée (et critique si nécessaire) des documents

Document 1 : Variation des températures depuis 1850
Ce document présente l'évolution de la température depuis 1850, en prenant pour référence la température moyenne du XXe siècle (correspondant au zéro de l'axe des ordonnées). On note qu'entre 1850 et 1900, les températures sont restées relativement stables. Par contre depuis 1900, la température a augmenté de 0,8 °C (passant de -0,6 °C à +0,2 °C). Le texte explique qu'il s'agit d'un réchauffement 50 à 100 fois plus rapide que les variations enregistrées au cours des temps géologiques.

Document 2 : Le plus grand réchauffement climatique passé de notre ère
Le texte explique que des réchauffements climatiques ont déjà été observés au cours des temps géologiques, en prenant l'exemple de l'optimum climatique de l'Eocène (il y a 56 millions d'années) avec une augmentation de la température de 6 °C. Cependant, ces variations ont été enregistrées sur une période de 10 à 20 000 ans. Ces informations sont à mettre en lien avec le document 1 pour montrer la rapidité beaucoup plus importante des modifications actuelles (+1 °C en un siècle).

Document 3 : Variation de la température durant les 400 000 dernières années
Le graphique présente les alternances entre périodes glaciaires (d'une durée d'environ 100 000 ans) et interglaciaires (d'une durée d'environ 10 000 ans).



Source : https://brian-mountainman.blogspot.com/2018/

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Les modifications climatiques sont donc un phénomène naturel lié aux modifications des paramètres astronomiques (une ressource complémentaire à ce sujet : http://www.les-crises.fr/climat-14-milankovitch/).
Ce document est à mettre en lien avec le document 2, présentant l'exemple de l'Eocène. Ainsi, comme depuis 20 000 ans, la Terre est dans une période interglaciaire, nous devrions aller naturellement vers une période glaciaire et non un réchauffement.

D'autres ressources pour déconstruire cette idée reçue :

- Analyse d'une conférence d'un climatosceptique français qui permet d'avoir des arguments précis et des axes de réponses à discuter avec les élèves en classe : https://www.youtube.com/watch?v=GMoqkWjSGvw
- Il est possible d'imaginer un travail sur la fiabilité des sources documentaires en utilisant des articles tirés de sites climato-septiques et des documents du GIEC en parallèle.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

« Le réchauffement climatique n'est pas d'origine humaine » IDÉE REÇUE (p. 13)

Lien avec le programme :

- Histoire, enjeux et débats :
  - Les enjeux du réchauffement climatique global.
  - Les acteurs des analyses climatiques : recherche et programmes mondiaux (Organisation Météorologique Mondiale, modèles climatiques) ; coordination (Nations-Unies) ; évaluation (Groupe Intergouvernemental pour l'Étude du Climat).

Objectifs du programme travaillés :

- 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.

Objectifs méthodologiques :

- Tirer des informations de documents de nature variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

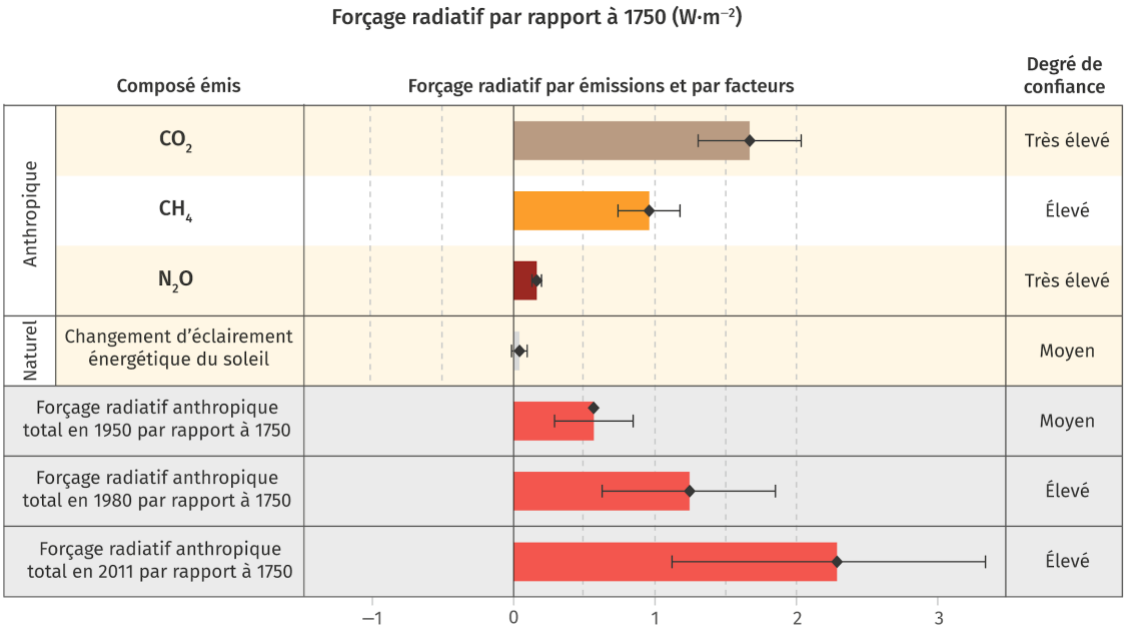
Présentation détaillée (et critique si nécessaire) des documents

Document 1 : Le rôle de l'être humain dans le forçage radiatif

La notion d'effet de serre ayant déjà été vue en première, ce document permet de remobiliser ces notions et de définir le terme de forçage radiatif. Le CO_2 est le principal gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère. Les activités humaines sont responsables d'un forçage radiatif positif de 2,2 W/m_2, alors que les variations naturelles sont quasiment nulles.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

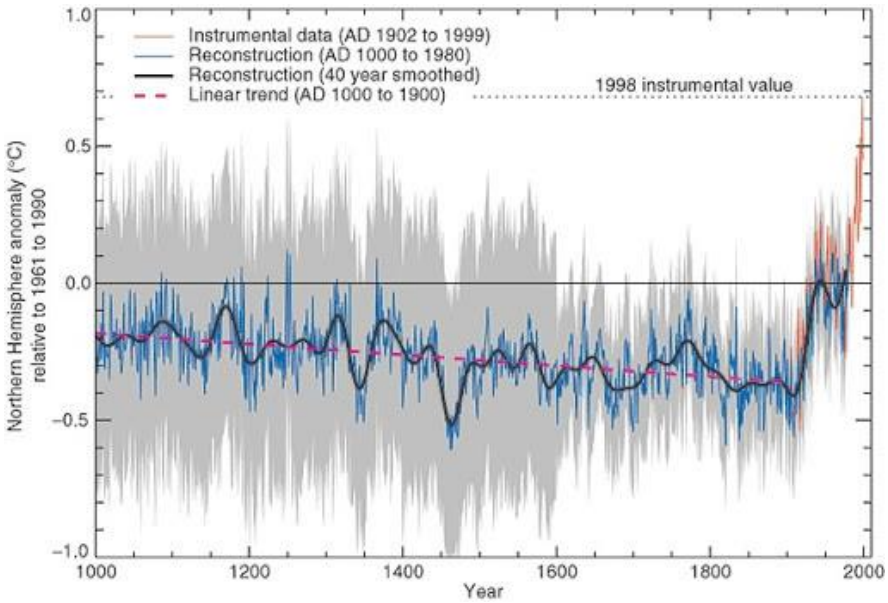
Il est possible de compléter ce document par un document plus complet comme celui-ci, issu d'un rapport du GIEC :



Ce document est à mettre en lien avec le document 2 pour expliquer l'évolution de la quantité de CO_2 au cours du temps.

Document 2 : Les variations du taux de CO_2 au cours des derniers millénaires

Ce document montre que le taux de CO_2 atmosphérique est resté stable jusqu'au début du XIXe siècle, puis que celui-ci a brusquement augmenté de manière significative entre 1850 et aujourd'hui. Cette augmentation est à mettre en lien avec la révolution industrielle. On peut aussi noter l'origine des résultats : carottes de glaces prélevées aussi bien en Antarctique qu'en Arctique, permettant une vision globale, puis, depuis le milieu du XXe siècle des mesures directes dans l'atmosphère. Pour compléter, on peut étudier le graphique de l'évolution de la température durant cette même période.



Document sous licence libre Creative Commons

À noter : Les milieux climato-sceptiques utilisent beaucoup cette courbe pour expliquer que les résultats scientifiques sont falsifiés et faux (voir cet article notamment : http://co2thetruth.e-monsite.com/pages/francais/resumons-comment-le-giec-s-est-discredite-par-ses-manipulations-politico-ecologiques.html).
Un décryptage intéressant est apporté par cette vidéo qui analyse la conférence d'un scientifique français climato-sceptique assumé (Vincent Courtillot, géophysicien et non spécialiste en climatologie) : https://www.youtube.com/watch?v=GMoqkWjSGvw.
Ce document peut donc constituer une base d'étude et de discussion autour de ces problématiques.

Document 3 : Évolution de la température depuis 1975
Ce document présente l'évolution de la température depuis 1975 par rapport à la valeur moyenne de celle-ci au cours du XXe siècle. On observe que les valeurs obtenues par mesures directes et par satellites coïncident et cela tend à dire qu'elles sont fiables. On note une augmentation de 0,5 °C depuis 1980. Ces informations sont à mettre en lien avec les connaissances des élèves sur l'essor de l'industrie au cours du XXe siècle, et les documents 1 et 2, prouvant le rôle des humains dans le réchauffement climatique.

D'autres ressources pour déconstruire cette idée reçue :

- Il est également possible d'utiliser les données présentées dans les chapitres 3 et 4 pour prouver le rôle des humains dans les modifications climatiques actuelles.
- https://www.franceinter.fr/environnement/donald-trump-un-climato-sceptique-a-la-tete-du-pays-le-plus-pollueur-au-monde : Article sur la sortie des États-Unis des Accords de Paris.
- https://www.dailymotion.com/video/x5opbbw : vidéo *Le point* sur les positions de Trump en matière d'environnement.

D'autres idées reçues à déconstruire :

- « Les preuves du réchauffement climatique qui nous sont apportées ne sont pas fiables ».
- « Le réchauffement climatique n'est pas si important que cela ». On peut alors, partir de l'article suivant (réduit en taille mais dont les propos n'ont pas été modifiés et issu d'un des sites indiqués dans la sitographie). L'illustration est celle présentée par l'auteur.

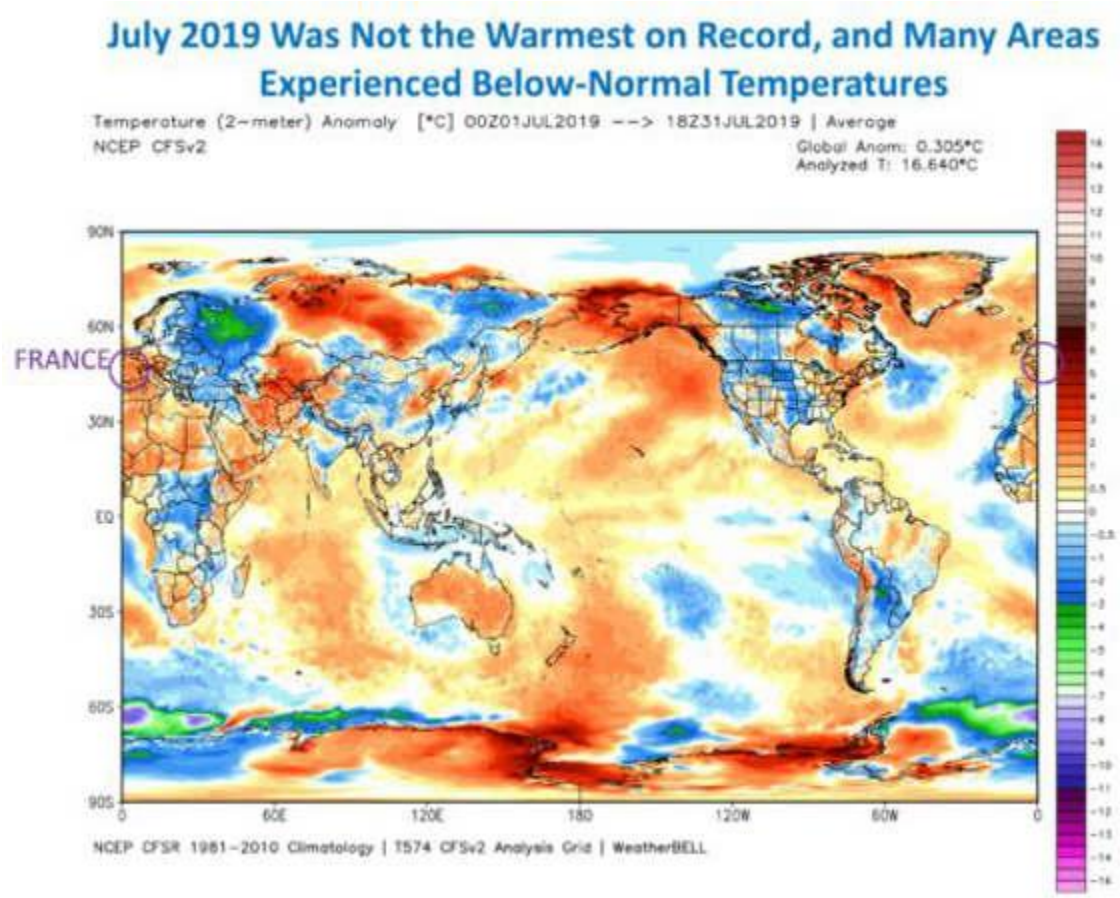
Document supplémentaire : Juillet 2019 n'a pas été le mois le plus chaud jamais enregistré

« De nombreux médias (CNN, BBC, Reuters) par exemple, ont déjà déclaré que le mois de juillet 2019 a été le mois le plus chaud jamais enregistré. [...]
Divers organismes de prévisions météorologiques à travers le monde ont des experts qui recueillent une grande variété de données auprès de nombreuses sources et déterminent quelles sont celles qui disposent d'informations sur la météo et celles qui n'en disposent pas. [...]
La carte des anomalies de la température de surface de juillet 2019 montre une température moyenne mondiale supérieure de 0,3 °C à la moyenne de la période 1982-2010. On mesure à partir de cette carte à quel point les informations ont été déformées au sujet des épisodes

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

temporaires de chaleur en France, qui selon les médias ont contribué à augmenter la chaleur moyenne dans le monde. Oui, il a fait exceptionnellement chaud en France en juillet. Mais regardons la froideur de l'Europe de l'est et de la Russie occidentale. La presse en a-t-elle fait état ? Sans parler du fait que les températures aux États-Unis ont été en moyenne au-dessous de la normale ? [...]
Et n'étant seulement que de 0,3 °C supérieur à la moyenne, cela n'est somme toute pas terriblement alarmant. [...] »

Traduction du texte publié en anglais par le Dr Roy Spencer sur son blog
20 août 2019 / Association des climato-réalistes
https://www.climato-realistes.fr/juillet-2019-na-pas-ete-le-mois-le-plus-chaud-jamais-enregistre/



Il est alors envisageable de travailler sur la fiabilité des sources documentaires à partir de cet article et des documents fournis dans le manuel.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Un autre regard (p. 14-15)

S'entraîner à l'oral

D'autres idées pour travailler l'oral sur ce sujet :

- Débat argumenté entre climatosceptiques et non climatosceptiques :

Chaque groupe apporte des arguments. La construction d'un tel débat nécessite de fournir aux élèves (sous forme de fiches ou de padlet) des sources documentaires sur lesquelles s'appuyer en plus de leurs connaissances de cours acquises dans ce thème. Les documents fournis plus haut peuvent être alors utilisés comme ressources.
Point de départ possible : le document complémentaire juste au-dessus sur les températures en juillet 2019.

- Simulation de COP dans la classe avec 4 groupes d'élèves représentant 4 pays différents et des experts scientifiques.

- Simulation d'un procès entre militants écologistes et une société pétrolière ou gazière qui est attaquée pour non-respect des réglementations en lien avec les accords de Paris :

Plusieurs groupes d'élèves : les militants, les avocats des militants, les représentants de la société incriminée, les avocats de cette société, des experts scientifiques, un jury et un juge. Là encore, il est possible de construire une banque de ressources par groupes d'élèves afin de les aider dans la construction de leur argumentaire et contre-argumentaire.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Thème 2 : Le futur des énergies

Présentation **2**

Enjeux et débats **2**

Électricité et énergie : au croisement des sciences, de l'industrie et de la société (p. 92) 3

Focus : L'électromagnétisme, aux origines de l'électricité (p. 93) 5

Déconstruire les idées reçues **6**

« L'exploitation des ressources renouvelables ne pollue pas » IDÉE REÇUE (p. 94) 6

« L'électricité, de l'énergie à l'état pur » IDÉE REÇUE (p. 95) 8

Un autre regard (p. 96) **10**

Document sous licence libre Creative Commons

Présentation

Les pages d'ouverture du thème « Le futur des énergies » ont été conçues pour apporter une vision transversale sur les différents chapitres et d'amener les élèves à réfléchir à l'enjeu de société majeur aujourd'hui qu'est la transition énergétique.
Le parti pris a également été d'apporter des éléments de réflexion pour déconstruire des idées reçues sur les « énergies renouvelables » qui seraient non polluantes, et pour aiguiser l'esprit critique des élèves face aux informations que l'on trouve sur les réseaux sociaux et dans les médias d'une façon plus générale.
Les élèves n'étant pas tous scientifiques, ces pages permettent par ailleurs d'entrer dans le thème sous l'aspect sociétal plutôt que sous l'aspect purement scientifique : cela suscitera plus aisément l'intérêt de tous les élèves en vue d'aborder les aspects plus techniques du thème.

Sitographie :

Remarque : Ici sont regroupés des sites très généraux utilisables pour construire les cours et rechercher de la documentation fiable. D'autres sites beaucoup plus spécifique avec des articles précis seront proposés plus loin, lorsque les différents documents seront abordés, afin d'étayer spécifiquement vos connaissances ou recherches sur les thèmes abordés dans les documents.

- http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques : Le site ACCES de l'ENS de Lyon est une mine d'or pour trouver des données fiables et riches sur l'ensemble des domaines des sciences de la vie et de la Terre. Il est régulièrement actualisé, avec des propositions d'activités. On peut notamment citer ce dossier thématique : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/climat/dossiers/energie_demain
- Des informations sur l'électricité et son histoire, d'Ampère à Maxwell, en passant par Faraday : http://www.ampere.cnrs.fr/?lang=fr.
- Le site du CEA : www.CEA.fr, et plus particulièrement le livret sur les énergie du XXIe siècle : http://www.cea.fr/multimedia/Pages/editions/livrets-thematiques/energies-du-21e-siecle.aspx.
- Le site d'EDF : https://www.edf.fr/, avec de nombreuses animations permettant de comprendre les différents types de production d'énergie.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Enjeux et débats

Électricité et énergie : au croisement des sciences, de l'industrie et de la société (p. 92)

Comment utiliser cette double-page avec les élèves ?
Cette double page sert d'accroche pour entrer dans le thème et permettre aux élèves de se rendre compte de la place indispensable des recherches scientifiques et de l'histoire des sciences dans les débats de société, ici sur les thématiques énergétiques.
Il est alors possible d'aborder les différentes problématiques qui seront traitées dans les quatre chapitres de ce thème : la production d'électricité en fonction des différentes sources d'énergie primaire, son stockage, son transport et les conséquences environnementales de chaque source de production.

Lien avec le programme :
- Histoire, enjeux, débat :
  - Einstein et les quanta.
  - Les combustibles alternatifs à empreinte carbone réduite (abordé aussi dans le chapitre 8).
  - Les enjeux de l'utilisation de l'énergie nucléaire : de la fission à la fusion contrôlée.

Objectifs du programme travaillés :
- 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.

Objectifs méthodologiques :
- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation des documents

Document 1 : Des quanta aux panneaux solaires
Ce document présente la mise au point de la théorie de Max Planck selon laquelle la lumière serait transportées par « paquets » (théorie des quanta), puis sa validation par Albert Einstein. Le document montre l'évolution de la compréhension scientifique à travers l'histoire des sciences.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Document 2 : Des biocarburants pour la planète ?
Les biocarburants ont un bilan carbone presque nul, ce qui pourrait les rendre très avantageux face à la pollution engendrée par l'utilisation du pétrole. Mais cette solution n'est pas une panacée et doit être pensée à l'échelle globale, car elle peut aussi être source d'émission de GES. Chaque source d'énergie ayant des inconvénients à prendre en compte

Document 3 : Le nucléaire : d'hier à demain
Ce document pose les problèmes engendrés par l'utilisation de l'énergie nucléaire, à savoir les déchets radioactifs. Il présente une solution envisagée : la fusion nucléaire, mais qui n'est encore maîtrisée et donc opérationnelle.

D'autres ressources pour aller plus loin :

- https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/une-nouvelle-epoque-les-quanta-de-planck-851.php : un peu d'histoire des sciences sur la théorie des quanta (réservé aux abonnés).
- http://www.fao.org/3/i0100f/i0100f05.pdf : un rapport complet de la FAO de 2008 sur les conséquences environnementales des biocarburants.
- https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mercredi-12-juin-2019 : une émission de *La Méthode Scientifique* sur l'état de la recherche actuelle sur la fusion nucléaire.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

Focus : L'électromagnétisme, aux origines de l'électricité (p. 93)

Lien avec le programme :

- Histoire, enjeux, débat :
  - L'essor de l'électromagnétisme au XIXe siècle (abordé aussi dans le chapitre 5).

Objectifs méthodologiques :

- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation des documents

Document 1 : Électricité et magnétisme
Ce document présente l'étymologie des mots « électricité » et « magnétisme », montrant ainsi que ces phénomènes naturels ont été observés depuis longtemps.

Document 2 : Modèle de l'électromagnétisme
Retraçant les étapes scientifiques qui ont permis de mettre en évidence l'électromagnétisme, ce document montre aussi que les découvertes scientifiques sont un travail collectif qui s'inscrit dans la durée.

Document 3 : Les utilisations de l'électromagnétisme
Ce document conclut l'histoire de la découverte de l'électricité et du magnétisme en expliquant deux utilisations de l'électromagnétisme : le courant continu et le courant alternatif.

D'autres ressources pour aller plus loin :

- http://blogs.univ-poitiers.fr/p-remaud/files/2011/03/CoursENSIP6UneHistoireDeElectriciteDeAmbreAuxTelecoms.pdf : présentation qui relate l'histoire de l'électricité depuis la civilisation grecque.
- https://www.pourlascience.fr/sd/histoire-sciences/la-theo : article sur l'histoire de l'électromagnétisme (réservé aux abonnés).

D'autres pistes pour prolonger la réflexion :

La réflexion sera prolongée naturellement avec l'activité 1 du chapitre 5 sur l'induction électromagnétique et la production d'électricité dans les alternateurs.

Document sous licence libre Creative Commons

Déconstruire les idées reçues

« L'exploitation des ressources renouvelables ne pollue pas » IDÉE REÇUE (p. 94)

Comment utiliser cette page avec les élèves ?
Cette page a pour objectif de déconstruire les idées reçues concernant l'exploitation des ressources renouvelables. Ces dernières années, lorsque l'on parle d'écologie, le discours à tendance à se polariser. Cette double-page, en cohérence avec l'esprit du programme, a pour objectif d'apporter de la nuance dans cette vision binaire, en présentant des sources de pollution liées à l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables (vent, eau et soleil).

Lien avec le programme :
Cette double-page anticipe un peu sur le contenu traité dans le chapitre 6 sur la production d'électricité sans combustion.

Objectifs du programme travaillés :
- 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.

Objectifs méthodologiques :
- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation détaillée (et critique si nécessaire) des documents

Document 1 : Pollution liée aux éoliennes
Le document pose la question de la pollution des éoliennes au cours de leur fin de vie. Elles sont en effet difficiles à recycler à causes des matériaux des pales et du socle en béton qui, s'il restait en place, polluerait les sols.

Document 2 : Pollution liée aux panneaux solaires
Ce document pose la question de la pollution due aux panneaux solaires. Le principal problème vient de leur composition, à savoir les terres rares. Ceux-ci sont obtenus à la fois à l'aide de procédés polluants, mais leur recyclage lui-même est très complexe et donc coûteux.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

Document 3 : Impacts des barrages hydroélectriques

Les barrages hydroélectriques permettent de produire de l'énergie sans émettre de GES et posent moins de questions sur leur recyclage que les éoliennes et les panneaux solaires. Pourtant, leur implantation n'est pas sans conséquence sur l'environnement et la biodiversité, qu'il faut donc prendre en compte avant l'installation.

D'autres ressources pour déconstruire cette idée reçue :

- https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-chine-bombe-retardement-panneaux-solaires-72746/ : un article sur la pollution qu'engendreront les panneaux solaires installés en Chine dans 30 ans.
- https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/cop24/pourquoi-les-energies-renouvelables-sont-moins-propres-que-vous-ne-le-pensez-en-tout-cas-pourl-instant_3075963.html : un document synthétique sur la pollution générée par les énergies renouvelables.
- https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/hydraulique/enjeux/enjeux-environnementaux/preserver-la-biodiversite : un document présentant la politique d'EDF pour préserver la biodiversité autour des barrages hydroélectriques.
- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/hydroelectricite : un document complet du Ministère de la Transition écologique sur l'hydroélectricité.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA

« L'électricité, de l'énergie à l'état pur » IDÉE REÇUE (p. 95)

Comment utiliser cette page avec les élèves ?
Cette page est un peu plus théorique que les autres, mais elle est tout autant essentielle. Un des obstacles conceptuels les plus importants à la bonne compréhension des notions traitées dans ce thème est la misconception que l'énergie et l'électricité sont des substances.
Cette déconstruction de conception initiale a normalement eu lieu au collège, mais cette page permet de faire un rappel.

Objectifs du programme travaillés :
- 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.

Objectifs méthodologiques :
- Tirer des informations de documents de natures variées.
- Argumenter à partir de documents pour répondre à une problématique.
- Travailler l'esprit critique et la fiabilité des sources documentaires.

Présentation détaillée (et critique si nécessaire) des documents

Document 1 : L'électricité stockée dans les piles
Le document indique que l'électricité n'est pas une substance, car elle ne peut pas être stockée. Le document propose l'exemple d'une pile, dans laquelle on ne trouve pas de l'électricité, mais des matériaux qui permettent la circulation d'électrons et donc la production d'électricité.

Document 2 : La couleur des éclairs
Le document explique aussi qu'un éclair n'est pas la forme visible de l'électricité. Il détaille la formation d'un éclair lors d'un orage : la couleur vient de l'état physique de l'air sous forme de plasma, qui permet la recombinaison d'électrons.

Document 3 : L'électricité dans les alternateurs
Ce document explique comment l'énergie est produite (« induite ») dans un alternateur, par la circulation des électrons.

Document 4 : Alors l'énergie, qu'est-ce que c'est ?
Ce document permet de conclure sur le fait que l'énergie n'est pas une substance, mais une grandeur utilisée pour décrire l'état de systèmes. Par ailleurs, il explique que l'électricité n'est qu'un moyen parmi d'autres de transférer de l'énergie entre deux systèmes.

Document sous licence libre Creative Commons
CC BY NC SA

D'autres ressources pour déconstruire cette idée reçue :

- Un dossier assez complet du CEA sur ce qu'est l'énergie : http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/essentiel-sur-energies.aspx :

Document sous licence libre Creative Commons

Un autre regard (p. 96)

S'entraîner à l'oral

Le grand oral fait partie des nouveautés de cette réforme du lycée. La maîtrise de l'expression orale est donc un enjeu essentiel de la réussite au bac des élèves. Dans cette optique, nous proposons diverses situations permettant aux élèves de s'exercer à l'expression orale.

D'autres ressources pour travailler l'oral sur ce sujet :

- La convention citoyenne est une assemblée de citoyens tirés au sort à qui le gouvernement a demandé de faire des propositions, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre du pays : https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/
  Si les élèves ne semblent pas inspirés par la thématique proposée, on peut leur donner une partie de la liste de la convention citoyenne et leur demander de défendre l'une des propositions.

Document sous licence libre Creative Commons
BY NC SA