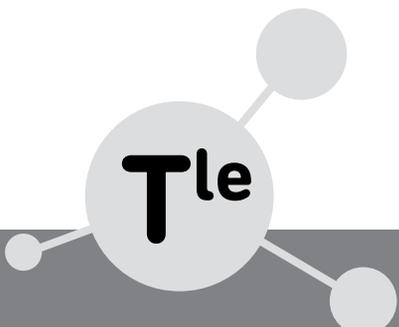


Enseignement

The logo consists of a central grey circle containing the text 'Tle' in a bold, black, sans-serif font. Three lines radiate from the circle to three smaller grey circles, forming a network or molecular structure.

T^{le}

SCIENTIFIQUE

Coordination

Patrice **Baudevin** et Evelyne **Masson**

Auteurs

Philippe **Augeray**

Vincent **Baumard**

Ludovic **Bourrachot**

Philippe **Brunet**

Benoît **Carrier**

Hélène **Claude**

Bertrand **Coiffier**

Sébastien **Heckmann**

Stéphane **Herrero**

Sandrine **Jomard**

Evelyne **Masson**

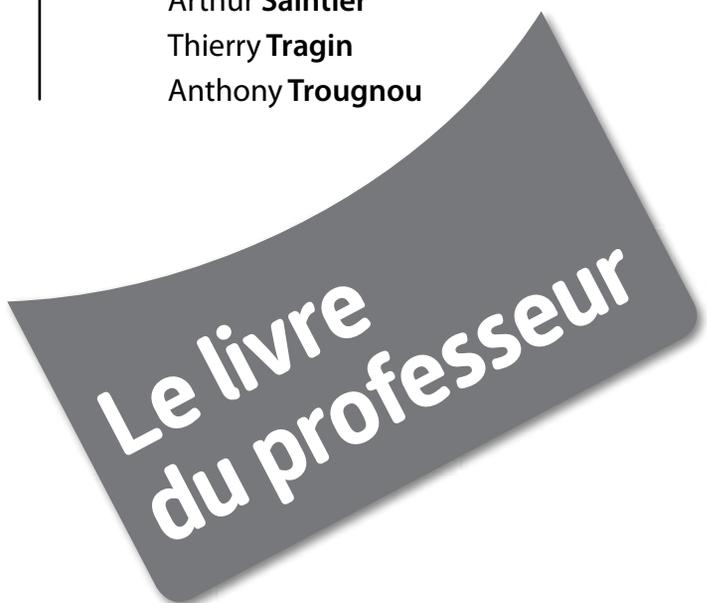
Nadia **Ouahioune**

Gaëlle **Quentric**

Arthur **Saintier**

Thierry **Tragin**

Anthony **Trounou**

A dark grey, curved banner with white text, tilted upwards from left to right.

**Le livre
du professeur**

MAGNARD

Édition : Malvina Juhel

Responsable éditorial : Adrien Fuchs

Couverture : Primo&Primo

Mise en page : SCM, Toulouse

Le photocopillage, c'est l'usage abusif et collectif de la photocopie sans autorisation des auteurs et des éditeurs. Largement répandu dans les établissements d'enseignement, le photocopillage menace l'avenir du livre, car il met en danger son équilibre économique. Il prive les auteurs d'une juste rémunération. En dehors de l'usage privé du copiste, toute reproduction totale ou partielle de cet ouvrage est interdite. Aux termes du Code de la propriété intellectuelle, toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle de la présente publication, faite par quelque procédé que ce soit (reprographie, microfilmage, scannérisation, numérisation...) sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie doit être obtenue auprès du Centre Français d'exploitation du droit de Copie (CFC) – 20, rue des Grands-Augustins – 75006 PARIS – tél. : 01 44 07 47 70 – fax : 01 46 34 67 19.

© Magnard – Paris, 2019 – 5 allée de la 2^e D.B., 75015 Paris

ISBN : 978-2-210-11415-9

SOMMAIRE

Chapitre 1	L'atmosphère terrestre et la vie	5
Chapitre 2	La complexité du système climatique	15
Chapitre 3	Le climat du futur	23
Chapitre 4	Énergie, choix de développement et futur climatique	33
Chapitre 5	Deux siècles d'énergie électrique	43
Chapitre 6	Les atouts de l'électricité	53
Chapitre 7	Optimisation du transport de l'électricité	63
Chapitre 8	Choix énergétiques et impacts sur les sociétés	71
Chapitre 9	La biodiversité et son évolution	83
Chapitre 10	L'évolution comme grille de lecture du monde	93
Chapitre 11	L'évolution humaine	103
Chapitre 12	Les modèles démographiques	115
Chapitre 13	L'intelligence artificielle	123
Dossier Bac	Sujets d'entraînement	135
Fiches maths	141

CHAPITRE 1 L'atmosphère terrestre et la vie

I. Introduction

Programme

Depuis l'époque de sa formation, quasi concomitante avec celle du Soleil et des autres planètes du système solaire, la Terre a connu une évolution spécifique de sa surface et de la composition de son atmosphère. Sa température de surface permet l'existence d'eau liquide, formant l'hydrosphère.

Aux facteurs physiques et géologiques (activité solaire, distance au Soleil, tectonique) s'est ajoutée l'émergence des êtres vivants et de leurs métabolismes. Un fragile équilibre est atteint, qui permet la vie et la maintient.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Il y a environ 4,6 milliards d'années, l'atmosphère primitive était composée de N₂, CO₂ et H₂O. Sa composition actuelle est d'environ 78 % de N₂ et 21 % de O₂, avec des traces d'autres gaz (dont H₂O, CO₂, CH₄, N₂O).</p> <p>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, dans laquelle s'est développée la vie.</p> <p>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.</p> <p>Les sources et puits de dioxygène atmosphérique sont aujourd'hui essentiellement liés aux êtres vivants (photosynthèse et respiration) et aux combustions.</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>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.</p>	<p>Analyser des données, en lien avec l'évolution de la composition de l'atmosphère au cours des temps géologiques.</p> <p>Déterminer l'état physique de l'eau pour une température et une pression donnée à partir de son diagramme d'état.</p> <p>Mettre en relation la production de O₂ dans l'atmosphère avec des indices géologiques (oxydes de fer rubanés, stromatolithes ...).</p> <p>Ajuster les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène.</p> <p>Interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet.</p> <p>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.</p>

Prérequis et limites

L'enjeu est de comprendre les relations étroites entre l'histoire de la Terre et celle de la vie. Sans chercher à dater précisément chaque événement, il s'agit de connaître les différentes échelles de temps concernées. Aucun développement général sur les réactions d'oxydo-réduction n'est attendu.

Commentaires pédagogiques

Le thème « Science, climat et société » entre en résonance avec l'enjeu contemporain posé par l'évolution du climat en lien avec les activités humaines. Il permet de fait d'interroger les effets de la science sur la société. Il poursuit une progressivité des apprentissages amorcée dès le cycle 3 avec les questions d'environnement, de ressources naturelles, de climat et de météorologie. Il représente un excellent support d'apprentissage pour aborder les systèmes complexes, c'est-à-dire les systèmes que l'on ne peut étudier que par une modélisation et dont l'approche nécessite une démarche systémique, en l'occurrence mise en œuvre dans les sciences du climat, qui croise les savoirs de la physique, de la chimie, de la biologie, de la géologie, des mathématiques et de l'informatique. Néanmoins l'enjeu est tel qu'il concerne également les technologies et l'économie.

Dans ce cadre, le chapitre 1 vient poser les bases historiques, physiques, chimiques, biologiques et géologiques permettant d'appréhender l'atmosphère, qui en tant que composante majeure du système climatique sera ensuite au cœur des modèles construits dans les trois chapitres suivants.

L'atmosphère terrestre est tout d'abord présentée dans sa singularité par rapport à celles d'autres planètes telluriques du fait des conditions physiques régnant sur Terre (activité 1). On découvre ainsi les méthodes employées par les scientifiques pour reconstituer les conditions régnant sur Terre après sa formation, il y a 4,6 Ga (précisons que l'atmosphère moins bien connue de la période de $-4,6$ à $-4,4$ Ga, vraisemblablement riche en He et H_2 , n'est pas abordée). Le constat de sa richesse en dioxygène conduit à découvrir le rôle des processus métaboliques du vivant et ainsi d'établir, à travers son abondance, la relation étroite entre l'évolution de la composition de l'atmosphère et les conditions de vie sur Terre (activité 2). L'exemple contemporain du trou de la couche d'ozone (activité 3) illustre l'interdépendance entre le dioxygène et le vivant qui produit le dioxygène qui est transformé en ozone dans l'atmosphère et dont l'accumulation garantit le maintien de la plupart des formes de vie terrestres. L'aspect « sociétal » du « trou de la couche d'ozone » peut être accentué en privilégiant une étude sous l'angle « Histoire, enjeux et débats » suggéré par le programme. Enfin l'atmosphère est vue comme un réservoir de carbone (activité 4) sous sa forme minérale CO_2 qui est en perpétuel échange avec d'autres réservoirs via des flux de matière riches en carbone. Ceci permet de donner les bases pour la compréhension de certains des mécanismes agissant sur le réchauffement climatique par les gaz à effet de serre dont le CO_2 est le représentant majeur.

Ainsi ces quatre activités croisent des notions de biologie, de chimie, de physique et de géologie. Une attention toute particulière doit donc être portée à l'articulation entre ces champs que les élèves ont généralement l'habitude d'aborder de façon plus cloisonnée.

Une attention particulière doit également être portée sur la question des ordres de grandeur car les notions abordées dans ce chapitre se développent sur des échelles d'espace et de temps très diverses. Ainsi s'il est relativement aisé d'associer l'origine du dioxygène avec l'existence des êtres vivants photosynthétiques, il n'est pas si simple de se représenter le fait que les mécanismes responsables de la charge de l'atmosphère en dioxygène se sont étalés sur pratiquement 2 milliards d'années pour conduire à la teneur actuelle. De même, l'expression des flux de carbone en Gigatonnes par an représente également des quantités difficilement appropriables qu'il convient d'éclairer avec soin.

Pour ces raisons, les cycles de la matière étudiés peuvent se révéler abstraits pour les élèves. Un temps d'explicitation des flux est à envisager, éventuellement par quelques manipulations simples. Toutefois, un certain nombre des phénomènes associés à ces flux sont connus des élèves (photosynthèse, respiration, dissolution, sédimentation...). Il s'agira donc essentiellement de les remobiliser sans les développer au-delà des savoirs déjà acquis des élèves et d'identifier leurs places au sein du cycle.

Objectifs

- Établir l'évolution de l'atmosphère au cours des temps géologiques.
- Montrer le rôle des êtres vivants dans la production de dioxygène sur Terre.
- Montrer l'importance de l'élément oxygène dans l'évolution de la biosphère.
- Identifier les principaux réservoirs et flux de carbone.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- M. Renard, Y. Lagabrielle, *Éléments de géologie – 16^e édition du « Pomerol »*, Dunod (2018).
- Sous la direction de J.-Y. Daniel, *Sciences de la Terre et de l'Univers – 3^e édition*, Vuibert (2014).
- C. Robert, R. Bousquet, *Géosciences – La dynamique du système Terre*, Belin (2013).
- P. de Wever, B. David, *Paléobiosphère – Regards croisés des sciences de la vie et de la Terre*, MNHN, SGF, Vuibert (2010).

► Sites Internet

- <https://planet-terre.ens-lyon.fr/>
- <http://accs.ens-lyon.fr/accs>
- <https://www.cnrs.fr/cnrs-images/sciencesdelaterreaulycee/>
- <http://culturesciences.chimie.ens.fr/>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 14

1. a
2. c
3. b et c
4. a

Activités p. 16-23

Activité 1. L'atmosphère primitive et son évolution

• **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

• **Commentaires sur l'activité**

L'objectif de cette activité est bien sûr de comprendre que l'atmosphère primitive de la Terre était différente de celle d'aujourd'hui. Néanmoins, les moyens utilisés par les scientifiques leur permettant d'émettre des hypothèses sur sa composition initiale et son évolution devront également être mis en perspective. Cette activité s'inscrit donc dans l'objectif de l'Enseignement scientifique sur la compréhension de l'élaboration du savoir scientifique.

• **Corrigés du guide de travail**

1. On suppose que :
 - les gaz contenus dans les chondrites, météorites pierreuses formées en même temps que l'en-

semble du système solaire, sont analogues à ceux de l'atmosphère terrestre primitive ;

- les gaz volcaniques terrestres mantelliques peuvent avoir une origine suffisamment profonde pour conserver les traces des gaz de l'atmosphère primitive.

On formule alors l'hypothèse que cette dernière était majoritairement composée de vapeur d'eau (environ 80 %), de CO₂ (environ 15 %) et de N₂ et autres gaz (environ 5 %).

2. Le diagramme d'état de l'eau nous précise les conditions de pression et de température dans lesquelles l'eau est liquide. Pour une pression atmosphérique de 1,013 bar, pression régnant (actuellement) à la surface de la Terre, la température doit être comprise entre 0 et 100 °C. La température de surface terrestre attendue lorsque l'atmosphère n'a pas de gaz à effet de serre est de -17 °C, alors que la température réelle est de +15 °C. À cette température, l'eau est à l'état liquide. C'est donc la distance de la Terre au Soleil et la présence d'une atmosphère possédant des gaz à effet de serre qui permettent l'état liquide de l'eau sur Terre.

3. L'actualisme est le principe qui postule que les lois qui régissent les phénomènes géologiques actuels sont les mêmes que celles qui s'exerçaient dans le passé. Si des rides de courant fossiles datant de l'Archéen présentent les mêmes caractéristiques que des rides de courant laissées par l'océan sur un littoral actuel, c'est que l'eau liquide était présente à l'Archéen (-4 Ga ; -2,5 Ga).

Synthèse

La Terre présente une atmosphère primitive riche en dioxyde de carbone, en diazote et en vapeur d'eau. On peut supposer que le refroidissement de la surface de la Terre primitive, sa distance au Soleil et la présence de gaz à effet de serre dans son atmosphère ont permis la liquéfaction de la vapeur d'eau. On notera la disparition de la quasi-totalité du dioxyde de carbone atmosphérique et la présence notable de dioxygène conduisant à la composition actuelle : 78 % de diazote, 21 % de dioxygène et des traces d'autres gaz.

Activité 2. La vie et l'apparition de dioxygène

- **Objectif :** Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité a pour objectif de montrer que l'évolution de l'atmosphère est intrinsèquement liée au développement de la vie sur Terre. C'est l'activité photosynthétique de cyanobactéries qui a été à l'origine de l'apparition du dioxygène dans l'atmosphère. Là encore, on insistera sur les méthodes d'élaboration du savoir scientifique (principe d'actualisme, expériences analogiques). La mise en évidence de l'oxydation des ions fer II grâce à des organismes photosynthétiques est réalisable en classe. Si les conditions ne permettent pas de réaliser l'expérience, il est possible de projeter la vidéo d'expérience pour que les élèves puissent décrire et analyser l'évolution de la teneur en dioxygène.

- **Corrigés du guide de travail**

1. L'actualisme est le principe qui postule que les lois qui régissent les phénomènes géologiques actuels sont les mêmes que celles qui s'exerçaient dans le passé.

Les stromatolithes sont considérés comme étant des traces des premières formes de vie sur Terre. Certains sont datés de -3,5 Ga. Or, ces stromatolithes sont construits à partir de l'activité biologique de cyanobactéries. Elles utilisent le dioxyde

de carbone pour la production de matière organique et libèrent ainsi du dioxygène. De plus, les scientifiques estiment qu'elles produisent et libèrent entre 50 et 85 % du dioxygène atmosphérique que nous respirons. On peut donc penser qu'elles sont bien responsables de l'enrichissement des océans en dioxygène.

2. Les premiers océans formés, milieux aqueux acides, sont riches en ions fer II (Fe^{2+}). Suite à de nombreuses transformations chimiques, le pH des océans a augmenté. L'alternance de lits siliceux et de lits constitués d'hématite rouge, dans les fers rubanés datés de -3,1 Ga, permet de supposer que les ions fer II ont progressivement été oxydés, par le dioxygène produit par les cyanobactéries, en ions fer III (Fe^{3+}) formant ainsi les précipités d'oxyde de fer III constituant l'hématite. C'est entre -3,5 Ga et -1,9 Ga que l'essentiel de ces gisements de fers rubanés se sont formés. C'est uniquement lorsque les eaux océaniques n'ont plus contenu d'ions fer II (Fe^{2+}), vers -2,4 Ga, que le dioxygène a été libéré dans l'atmosphère.

3. L'équation d'une réaction chimique est ajustée si le nombre d'éléments de chaque espèce chimique est conservé lors de la réaction.

À gauche, du côté des réactifs, il y a 4 éléments fer, et 6 éléments oxygène ($4 + 2 \times 1$).

À droite, du côté des produits, il y a 4 éléments fer (2×2) et 6 éléments oxygène (2×3).

L'équation de la réaction est donc bien ajustée.

Synthèse

— Voir le schéma en bas de page. —

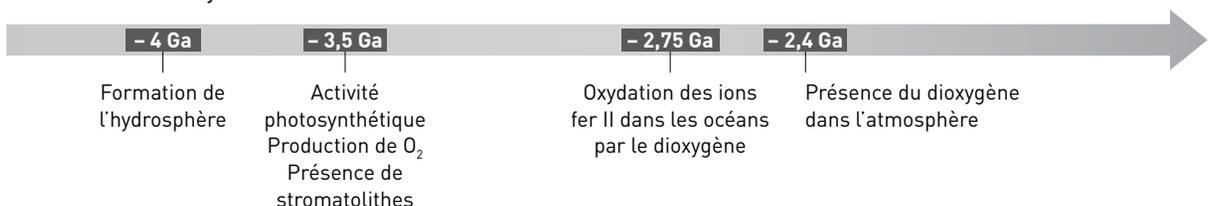
Activité 3. L'élément oxygène dans notre atmosphère

- **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

Dans cette activité seront envisagés les liens existant entre l'élément oxygène, présent notamment dans les molécules de dioxygène et d'ozone, et le

► Schéma de la synthèse de l'activité 2.



développement de la vie. Les débats scientifiques des années 80 sur l'amincissement de la couche d'ozone permettront d'identifier et de comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement. Cette activité peut donc être l'occasion de traiter le point Histoire Enjeux Débats « Le trou dans la couche d'ozone : de sa découverte à des prises de décisions mondiales ».

• Corrigés du guide de travail

1. Un puits de dioxygène est un réservoir (naturel ou artificiel) qui absorbe du dioxygène en circulation. On peut citer la biosphère (respiration); la lithosphère (oxydation de la matière organique, altération des roches de la lithosphère) et la combustion anthropique.

Une source de dioxygène est un dispositif ou un processus qui libère du dioxygène dans l'atmosphère. On peut citer la biosphère (photosynthèse) et la lithosphère (dissolution des calcaires, enfouissement de la biomasse riche en carbone organique).

Notamment par les processus de respiration et de photosynthèse, on peut montrer que ces réservoirs de dioxygène sont liés aux êtres vivants.

2. La formule chimique de l'ozone est O_3 . On considère que, sous l'impact d'un photon de longueur d'onde inférieure à 240 nm, une molécule de dioxygène se dissocie en deux atomes d'oxygène libres. En présence d'une molécule intermédiaire, l'atome d'oxygène s'associe à une molécule de dioxygène pour former une molécule d'ozone. La formation de l'ozone dépend bien de la présence de dioxygène.

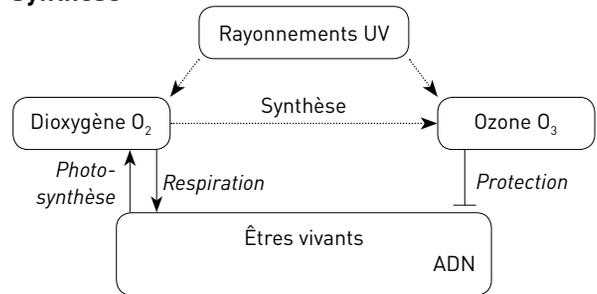
3. Dans le début des années 1980, les scientifiques mirent en évidence que la couche d'ozone diminuait de manière très inquiétante, surtout dans l'hémisphère sud.

L'étude des spectres d'absorption de l'ozone aux concentrations atmosphériques et de l'ADN montre un même maximum d'absorption dans une gamme de longueurs d'onde comprise entre 100 et 400 nm. Or, l'énergie apportée par ces rayons UV provoque des lésions de l'ADN. L'ozone de l'atmosphère, en absorbant l'énergie de ce rayonnement, limite l'effet de ce dernier sur l'ADN. Une altération de la couche d'ozone entraînerait donc un problème sanitaire planétaire.

La couche d'ozone semblant diminuer sous l'effet de certains aérosols utilisés massivement, les CFC (chlorofluorocarbures), en 1987 les États du monde entier prirent alors la décision lors du protocole de

Montréal d'arrêter l'utilisation de ces derniers. Cette décision, capitale pour l'humanité, inversa le phénomène de la disparition de la couche d'ozone. Depuis, celle-ci se reconstitue progressivement. Ce résultat positif n'a été possible que grâce au consensus auquel les États du monde entier ont abouti.

Synthèse



Activité 4. Le cycle du carbone et l'atmosphère

• **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• Commentaires sur l'activité

La mise en place du cycle du carbone dans cette activité permet de préparer les chapitres ultérieurs. En effet, la maîtrise de ce cycle permettra d'appréhender l'effet de l'augmentation du taux de CO_2 sur l'évolution des systèmes climatiques. Les combustibles fossiles, formes d'accumulation du carbone, étant des ressources non renouvelables, il apparaîtra nécessaire de présenter ensuite les scénarios de transition énergétique.

• Corrigés du guide de travail

1. Stocks (en Gt) des principaux réservoirs :

- Atmosphère : 770
- Biomasse, sols et litières : 2 200
- Océans : 39 000
- Lithosphère : 95 à 100×10^6

Les flux les plus importants :

- Entre atmosphère et biomasse, sols et litières : photosynthèse $120 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$; respiration et oxydations $120 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$
- Entre atmosphère et océans : dissolution $92 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$ et dégazage $90 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$
- Entre biomasse, sols et litières et océans : photosynthèse $50 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$; respiration $50 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$.
- Les flux liés à l'activité humaine : vers l'atmosphère, déforestation $2 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$ et combustions, $6 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$.

On peut identifier des réservoirs de petite taille : atmosphère et biomasse, sols, litières et des réservoirs de plus grande taille, océans et lithosphère. C'est cependant entre les réservoirs de petites tailles que les flux sont les plus conséquents.

Les flux liés à l'activité humaine, $8 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}$ de carbone libéré dans l'atmosphère, ne sont compensés pour partie que par une dissolution du CO_2 dans les océans (2 Gt).

2. Les combustibles fossiles sont essentiellement charbon et pétrole.

Le charbon exploité actuellement s'est essentiellement formé à partir des forêts tropicales du Carbonifère, à l'ère primaire, il y a -300 Ma .

Le pétrole, lui, provient d'organismes marins non dégradés et enfouis dans des bassins sédimentaires entre -20 et -350 Ma .

Les réserves de pétrole dans le monde sont estimées à 1 700 milliards de barils, or l'humanité consomme près de 100 millions de barils par jour à l'échelle mondiale.

Il faut un temps très long pour constituer des réserves de combustibles fossiles, on peut donc considérer que ce sont des ressources non renouvelables.

Synthèse

La connaissance du cycle du carbone permet d'évaluer (même si une incertitude existe) les stocks en carbone des différents réservoirs et permet d'avoir une idée de l'importance des échanges entre ces différents réservoirs. À partir de ces données, il est alors possible d'évaluer l'influence des activités humaines sur ces stocks et échanges, notamment ceux qui amènent à des modifications de la composition de l'atmosphère à l'origine de changements climatiques.

• Corrigés du parcours 2 (groupe sur le charbon)

Le charbon exploité actuellement s'est essentiellement formé à partir des forêts tropicales du carbonifère, à l'ère primaire, il y a 300 Ma.

Les réserves de charbon dans le monde sont estimées à plus de 1 million de tonnes, or l'humanité consomme plus de 3 500 millions de tep par an à l'échelle mondiale.

Il faut un temps très long pour constituer des réserves de combustibles fossiles, on peut donc considérer que ce sont des ressources non renouvelables.

Se tester

p. 26

- a.** Vrai **b.** Faux **c.** Faux
- a.** Faux **b.** Faux **c.** Vrai
- a.** Faux **b.** Vrai **c.** Vrai
- a.** 3
b. 2
c. 6
d. 5
- b**
- b** et **d**
- A : 6, B : 1, C : 7, D : 10, E : 5, F : 4, G : 8, H : 9, I : 2, J : 3.
- $3 \text{ Fe} + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$
 $4 \text{ Fe} + 3 \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$
 $4 \text{ FeO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$

Travailler des compétences scientifiques

p. 27

10. Formuler une hypothèse

L'image acquise le 9 septembre 2000 par la NASA montre un trou dans la couche d'ozone autour du pôle Sud, avec des valeurs inférieures à 300 unités Dobson en Antarctique et inférieures à 500 unités Dobson en Amérique du Sud, Afrique du Sud, Australie et Nouvelle-Zélande.

La proportion de décès par cancers de la peau est la plus élevée (entre 4,2 et 28,6 %) en Amérique du Nord, en Europe, en Asie centrale mais aussi en Amérique du Sud (Chili, Argentine), en Afrique du Sud, en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Certaines régions planétaires, où la proportion de cancers de la peau est élevée (Amérique du Sud (Chili, Argentine), Afrique du Sud, Australie et Nouvelle-Zélande), semblent être aussi des régions où la quantité d'ozone dans l'atmosphère est amoindrie. Or, l'ozone absorbe une partie du rayonnement ultra-violet et ce rayonnement absorbé par l'ADN est à l'origine de mutations génératrices de cancers. Même si d'autres facteurs interviennent probablement pour expliquer l'importante proportion de cancers de la peau en Amérique du Nord, Europe, Asie centrale (facteurs génétiques, comportementaux), on peut donc formuler l'hypothèse qu'une quantité d'ozone atmosphérique moindre est une des causes possibles d'un cancer de la peau.

Appliquer

p. 28-29

11. L'évolution de l'atmosphère terrestre

1. D'après ce graphique, la composition de l'atmosphère primitive de la Terre il y a 4,4 Ga était d'environ 80 % de vapeur d'eau, 15 % de CO₂ et 5 % de N₂.
2. Le dioxyde de carbone est un gaz à fort effet de serre. Avec une teneur aussi importante, on peut penser que la température à la surface de la Terre était élevée.
3. La teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère terrestre a fortement diminué depuis 3,5 milliards d'années. C'est un gaz soluble dans l'eau, on peut supposer qu'il s'est dissous dans les océans.

12. Le dioxygène dans l'atmosphère

C'est l'activité photosynthétique des cyanobactéries des stromatolithes qui est à l'origine de l'apparition du dioxygène sur Terre. Les premiers océans formés, milieux aqueux acides, étaient riches en ions fer II (Fe²⁺). Suite à de nombreuses transformations chimiques, le pH des océans a augmenté et les ions fer II ont progressivement été oxydés, par le dioxygène produit par les cyanobactéries, en ions fer III (Fe³⁺), formant ainsi les précipités d'oxyde de fer III constituant l'hématite. C'est l'alternance de lits siliceux et de lits constitués d'hématite rouge dans les fers rubanés qui nous permet de le supposer.

C'est entre -3,5 Ga et -1,9 Ga que l'essentiel de ces gisements de fers rubanés se sont formés et c'est uniquement lorsque les eaux océaniques n'ont plus contenu d'ions fer II (Fe²⁺) que le dioxygène a pu être libéré dans l'atmosphère, vers -2,4 Ga.

13. Couche d'ozone et UV

L'étude du spectre d'absorption des UV par l'ozone aux concentrations atmosphériques montre des valeurs d'absorbance élevées entre 200 et 300 nm. Or, c'est également dans cette zone de valeurs que l'ADN absorbe les UV entraînant des lésions de l'ADN (activité 3, document 3).

L'ozone de l'atmosphère, en absorbant l'énergie de ce rayonnement, limite donc l'effet de ce dernier sur l'ADN ce qui explique le rôle protecteur de la couche d'ozone atmosphérique.

14. Échanges de carbone entre atmosphère et hydrosphère

La carte des échanges en CO₂ entre l'atmosphère et la surface de l'océan fait apparaître une distribution de ceux-ci en bandes latitudinales. Les hautes latitudes (autour des pôles) se caractérisent par des flux négatifs, traduisant un passage de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan : le CO₂ est piégé par l'océan dans les hautes latitudes (dissolution). Les basses latitudes (autour de l'équateur) montrent des flux positifs correspondant à des passages de CO₂ de l'océan vers l'atmosphère : elles sont le siège d'un dégazage de CO₂, qui est alors libéré.

Ces flux sont liés à la solubilité du CO₂ dans l'eau, que l'on sait dépendant de la température. La concentration en CO₂ dissous dans l'eau est d'autant plus importante que la température de l'eau est basse.

Du fait des courants marins, la circulation des eaux froides polaires vers des zones de plus hautes températures modifie la solubilité du CO₂. En se réchauffant, ces eaux ne peuvent conserver autant de CO₂ dissous : elles sont donc le siège du dégazage observé dans les basses latitudes.

Remarque : dans cet exercice, les élèves doivent surtout décrire les échanges de dioxyde de carbone entre l'atmosphère et la surface de l'océan. En fonction des profils des élèves, il est possible d'aller plus loin et de chercher des explications à ces échanges et à leurs localisations, comme dans le corrigé qui est proposé ici.

S'entraîner

p. 29-30

15. Les états de l'eau

1. ① Fusion ② Vaporisation ③ Sublimation
2. L'eau initialement liquide passe à l'état solide (diminution de la pression et de la température).

16. Le cycle du carbone

1. Le réservoir pris ici en référence est le réservoir Atmosphère. Les valeurs négatives de certains flux représentent donc les pertes en carbone de ce réservoir.

Absorption de CO₂ par les océans : -2 Gt/an. Ce flux représente la dissolution du CO₂ dans l'eau des océans.

Capture de CO_2 par la végétation et les sols : $-2,7 \text{ Gt/an}$. Ce flux représente le prélèvement de CO_2 dans l'atmosphère par les processus liés à la photosynthèse.

Les valeurs positives représentent les gains en carbone du réservoir atmosphérique.

Émissions de CO_2 par la déforestation : $+2 \text{ Gt/an}$.

Émissions de CO_2 par les activités industrielles et domestiques : $+6 \text{ Gt/an}$.

Ces émissions sont liées à l'activité humaine.

2. La masse totale de carbone dont dispose les réservoirs est :

- Atmosphère 770 Gt
- Végétation 595 Gt
- Océan de surface 1 000 Gt
- Océan profond 38 000 Gt
- Biomasse marine 5 Gt
- Sédiments 150 000 Gt
- Sol (humus) 1 600 Gt
- Combustibles fossiles 6 600 Gt
- (Manteau) Volcans $< 0,1 \text{ Gt}$ (que l'on peut négliger par rapport aux autres valeurs)

Quantité totale : $770 + 595 + 1\,000 + 38\,000 + 5 + 150\,000 + 1\,600 + 6\,600$ soit $198\,570 \text{ Gt}$.

3. Le bilan annuel des échanges de carbone au niveau de l'atmosphère est :

$(6 + 2) - 2,7 - 2$ soit $+3,3 \text{ Gt/an}$.

Ce bilan positif montre une augmentation des émissions de carbone dans l'atmosphère, notamment en liaison avec les activités humaines. Ceci peut contribuer au réchauffement climatique.

17. L'hématite des fers rubanés

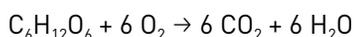
1. L'équation d'oxydation par le dioxygène de l'oxyde de fer II est $4 \text{ FeO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ Fe}_2\text{O}_3$.

2. Les premiers océans formés étaient des milieux aqueux acides, riches en ions fer II (Fe^{2+}). Suite à de nombreuses transformations chimiques, le pH des océans a augmenté et les ions fer II ont progressivement été oxydés, par le dioxygène produit par les cyanobactéries, en ions fer III (Fe^{3+}), formant ainsi les précipités d'oxyde de fer III constituant l'hématite. C'est uniquement lorsque les eaux océaniques n'ont plus contenu d'ions fer II (Fe^{2+}) que le dioxygène a pu être libéré dans l'atmosphère. C'est cette accumulation de tout le dioxygène produit par l'activité photosynthétique

des cyanobactéries, préalablement à sa libération dans l'atmosphère, qui fait des fers rubanés des « puits chimiques à oxygène ».

18. Les forêts produisent-elles du dioxygène ?

1. L'équation modélisant la respiration est :



2. Une forêt naturelle adulte à l'équilibre a une biomasse constante. Elle produit autant de matière organique par photosynthèse qu'elle en consomme par respiration. Elle ne produit pas alors de dioxygène excédentaire.

3. L'Amazonie est une vaste forêt située en Amérique du Sud. On peut noter tout d'abord que si poumon veut dire « fournisseur d'oxygène » dans la bouche des utilisateurs de cette expression, c'est un terme maladroite. En effet, un poumon absorbe du dioxygène et relâche du CO_2 ce qui est le contraire de ce que ferait l'Amazonie d'après les utilisateurs de cette expression. D'autre part, la forêt à l'équilibre produit autant de dioxygène qu'elle en consomme. L'Amazonie n'est donc pas un « poumon fournisseur de dioxygène ». Les dirigeants, les journalistes, les membres des associations écologistes etc. qui pensent que l'Amazonie fournit la Terre en dioxygène commettent de ce fait une erreur.

Pour aller plus loin

Un article scientifique de réflexion sur l'expression « l'Amazonie, le poumon de la Terre » :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/oxygene-Amazonie-poumon-Terre.xml>

4. D'après l'équation modélisant la respiration une forêt peut produire un excédent de dioxygène si :

- la totalité de la matière organique produite n'est pas dégradée par la respiration (cette matière organique est enfouie et fossilisée rapidement ce qui conduit à la formation de combustibles fossiles par exemple) ;
- la forêt est jeune et en pleine croissance. Elle produit un excédent de matière organique et donc de dioxygène par rapport à son utilisation par des processus respiratoires. Dans ce cas, elle n'est pas à l'équilibre.

► Tableau de l'exercice 19.

Réservoirs	Masse de carbone m (en Gt)	Flux d'entrée ou flux de sortie (en Gt · an ⁻¹)	Durée de séjour Δt (en années)
Atmosphère	770	Échanges avec la biomasse : 120 Échanges avec l'océan : 90 Flux total : 210	3,7
Biomasse, sols et litières	2 200	Échanges avec l'atmosphère : 120 Échanges avec l'océan : 50 Flux total : 170	12,9
Océans	39 000	Échanges avec l'atmosphère : 90 Échanges avec la biomasse : 50 Flux total : 140	278,6
Roches	100×10^6	Échanges avec la biomasse : 0,01 Échanges avec l'océan : 0,4 Flux total : 0,41	$243,9 \times 10^6$

19. Durée du séjour du carbone dans un réservoir

— Voir le tableau en haut de page. —

La durée de séjour d'un atome de carbone est de 3 à 4 ans dans l'atmosphère, d'environ 13 ans dans la biomasse, sols et litières (= biosphère), 250 à 300 ans dans les océans et d'environ 250 millions d'années dans les roches.

La durée de séjour est liée non seulement à la taille du réservoir mais aussi à l'importance des échanges mis en place entre le réservoir considéré et les autres. On peut donc distinguer :

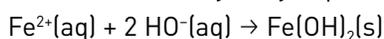
- des réservoirs superficiels avec une quantité modérée de carbone, mais le plus souvent mobilisable rapidement ;
- des réservoirs « profonds » avec une quantité importante de carbone, mais le plus souvent mobilisée lentement.

La connaissance de la durée de séjour du carbone dans un réservoir peut être un outil important pour gérer un stockage déterminé dont l'objectif serait de limiter l'élévation du taux de CO₂ dans l'atmosphère.

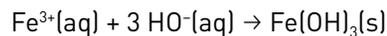
Vers le bac p. 31

20. Roches rouges et oxydation des ions fer

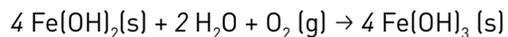
1. Si l'on ne tient pas compte des ions spectateurs, alors l'équation de la réaction entre les ions fer II (Fe²⁺) et les ions hydroxyde peut s'écrire :



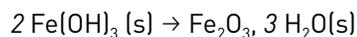
2. Si l'on ne tient pas compte des ions spectateurs, alors l'équation de la réaction entre les ions fer III (Fe³⁺) et les ions hydroxyde peut s'écrire :



3. L'équation de la réaction modélisant la transformation du précipité vert d'hydroxyde de fer II en hydroxyde de fer III est :



L'équation ajustée de la réaction modélisant la transformation de l'hydroxyde de fer III en oxyde de fer III hydraté est :



4. La couleur rouge des gisements de fer est liée à la transformation de l'hydroxyde de fer II en hydroxyde de fer III puis en oxyde de fer III hydraté. Or l'oxyde de fer III hydraté se forme à partir d'hydroxyde de fer II et de dioxygène. La présence d'oxyde de fer III hydraté, appelé hématite, sera donc témoin de la présence de dioxygène dans le milieu. On observera ainsi des couches rouges riches en hématite au niveau des fers rubanés marquant la présence progressive de dioxygène dans les océans produit par l'activité photosynthétique des cyanobactéries des stromatolithes.

21. Le dioxygène dans l'atmosphère

Doc 1 : ce sont des organismes microscopiques. La lame mince de cyanobactéries montre un chapelet de cellules. Le cytoplasme des cyanobactéries contient des pigments chlorophylliens. On peut supposer que ce sont des organismes photosynthétiques.

Doc 2 : quand on cultive des cyanobactéries dans une enceinte hermétique, à température constante de 20 °C, on observe :

- à l'obscurité : une baisse de la concentration en dioxygène et une hausse de la concentration en CO₂. On peut donc supposer que le dioxygène est consommé et le CO₂ produit. Ces échanges gazeux correspondent à ceux de la respiration.
- à la lumière : la concentration en dioxygène augmente alors que celle de CO₂ diminue. Les cyanobactéries consomment du CO₂ et rejettent du dioxygène. Ce sont les échanges gazeux de la photosynthèse.

Les volumes de gaz échangés par photosynthèse sont supérieurs aux volumes de gaz échangés par respiration. Le bilan gazeux, à la lumière, est donc

un rejet de dioxygène dans le milieu.

Selon le principe de l'actualisme, on peut penser que les cyanobactéries fossiles fonctionnaient comme les espèces actuelles. Par leur métabolisme photosynthétique, elles rejetaient du dioxygène dans leur milieu de vie, à savoir l'océan. On peut donc faire l'hypothèse que c'est l'apparition de cyanobactéries photosynthétiques qui est à l'origine du dioxygène dans l'océan puis vers -2,4 Ga dans l'atmosphère.

En conclusion, c'est donc l'apparition d'espèces autotrophes, photosynthétiques qui a permis la production de dioxygène, d'abord dans l'océan, puis dans l'atmosphère. C'est cette présence d'êtres vivants autotrophes qui explique la transformation de l'atmosphère primitive terrestre.

CHAPITRE 2 La complexité du système climatique Manuel p. 32-49

I. Introduction

Programme

Le système climatique et son évolution dans le temps résultent de plusieurs facteurs naturels et d'interactions entre océans, atmosphère, biosphère, lithosphère et cryosphère. Il est nécessaire de prendre en compte ces interactions à différentes échelles spatiales et temporelles (de l'année au million d'années voire davantage). Le système climatique présente une variabilité spontanée et réagit aux perturbations de son bilan d'énergie par des mécanismes appelés rétroactions. Les facteurs anthropiques ont des conséquences irréversibles à court terme.

Savoirs	Savoir-faire
<p>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.</p> <p>La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...).</p> <p>La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines).</p> <p>La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures <i>in situ</i> et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global. Il en existe d'autres : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers...</p> <p>Le climat de la Terre présente une variabilité naturelle sur différentes échelles de temps. Toutefois, depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration du CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement.</p>	<p>Distinguer sur un document des données relevant du climat d'une part, de la météorologie d'autre part.</p> <p>Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques.</p> <p>Identifier des traces géologiques de variations climatiques passées (pollens, glaciers).</p>
<p>Depuis un siècle et demi, on mesure un réchauffement climatique global (environ + 1 °C). Celui-ci 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 : CO₂, CH₄, N₂O et vapeur d'eau principalement.</p> <p>Lorsque la concentration des GES augmente, l'atmosphère absorbe davantage le rayonnement thermique infrarouge émis par la surface de la Terre. En retour, il en résulte une augmentation de la puissance radiative reçue par le sol de la part de l'atmosphère.</p> <p>Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle.</p> <p>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 la montée du niveau des océans.</p>	<p>Déterminer la capacité d'un gaz à influencer l'effet de serre atmosphérique à partir de son spectre d'absorption des ondes électromagnétiques.</p> <p>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, ...).</p> <p>Analyser la variation au cours du temps de certaines grandeurs telles que l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂, la variation de température moyenne, des indicateurs de l'activité économique mondiale.</p>
<p>L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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 diminution de l'albédo terrestre ; - le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère. 	<p>Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système.</p>

<p>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.</p> <p>Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles.</p> <p>À court terme, un accroissement de la végétalisation constitue un puits de CO₂ et a donc un effet de rétroaction négative (stabilisatrice).</p>	<p>Réaliser et interpréter une expérience simple, mettant en évidence la différence d'impact entre la fusion des glaces continentales et des glaces de mer.</p> <p>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.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Les notions d'équilibre radiatif de la Terre et d'effet de serre atmosphérique, étudiées en classe de première, sont mobilisées. L'étude des paramètres orbitaux de la Terre et de leur influence sur le climat n'est pas au programme.</p>	

Commentaires pédagogiques

L'atmosphère ayant été définie par sa composition et son évolution aux larges échelles de temps, le chapitre 2 aborde la question centrale du thème, le climat. Le climat est une notion familière des élèves (et de tout citoyen) dont la médiatisation a renforcé la visibilité. Pour autant c'est une notion dont la complexité échappe le plus souvent à tout un chacun et qui est souvent confondue avec les approches relevant de la météorologie. C'est donc tout l'enjeu du chapitre que de construire une représentation scientifique à la fois simple et précise de ce qu'est le système climatique et en quoi il constitue un système particulièrement complexe. Aux cycles 3 et 4 les élèves ont appris à distinguer la météo du climat. Dans ce chapitre il s'agit de remobiliser cette distinction afin de la préciser et de la stabiliser. Les élèves doivent comprendre que si la description du climat ou de la « météo » fait appel aux mêmes grandeurs, les échelles d'études sont très différentes (activité 1). C'est notamment l'échelle de temps qui est à prendre en compte. Si la climatologie travaille sur des intervalles de temps de 30 ans minimum, son champ d'étude peut s'étendre sur des durées avoisinant plusieurs millions d'années (activité 2). Le choix de prendre des exemples se plaçant à différentes échelles de temps permet de mettre en évidence de multiples variations et oscillations climatiques naturelles (activité 2) que l'on se contentera de constater en Enseignement scientifique, sans entrer dans le détail des méthodes scientifiques de reconstitutions (analyses isotopiques, etc.). L'accent doit toutefois être mis sur l'élévation de la température moyenne globale terrestre depuis la fin de la Révolution industrielle qui doit être rigoureusement étayée et mise en perspective des autres variations identifiées notamment pour ce qui est de la vitesse sans précédent de cet accroissement.

En revanche les élèves de spécialité SVT auront la possibilité d'approfondir les variations passées du climat dans le programme de terminale. Il est donc important que ce chapitre, et de façon plus générale ce thème, soit abordé en tronc commun avant le thème correspondant du programme de spécialité SVT. En Enseignement scientifique, mis à part l'effet de serre, il n'est pas attendu d'étude des mécanismes à l'origine des variations du climat.

Il n'est pas nécessaire de multiplier les exemples mais simplement de faire quelques constats de variations. Selon les conditions d'enseignement, des activités de TP peuvent être mises en œuvre pour répondre à l'objectif d'« Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » (par exemple l'observation de pollens fossiles). Ce sera l'occasion de faire pratiquer aux élèves quelques méthodes simples utilisées par les scientifiques. De même, selon sa région d'exercice, une recherche sur le terrain d'indices de variations climatiques (par exemple des marqueurs géologiques d'érosion glaciaire) peut aussi être une façon motivante d'aborder la notion de variabilité naturelle du climat.

Si les causes des variations passées ne sont pas à traiter, la contribution des gaz à effet de serre au réchauffement actuel doit conduire à la construction d'un mécanisme explicatif du réchauffement qui s'appuie sur la connaissance du bilan thermique de la Terre et de la compréhension de l'effet de serre étudiés en classe de première. Il s'agit de la principale difficulté du chapitre. En terminale, il va s'agir de cibler plus particulièrement certains gaz (ceux impliqués dans le réchauffement) et de comprendre leur

action en quantifiant leur effet sur le forçage radiatif – notion nouvelle dont la construction est à soigner – et en croisant cela avec leur temps de persistance dans l’atmosphère (activité 3). On montre ainsi en quoi leurs propriétés sont à l’origine du réchauffement de l’atmosphère puis on étudie quelques conséquences de cette augmentation sur les composants du système climatique, hydrosphère et biosphère principalement (activité 4). On met ainsi en évidence certaines régulations au sein du système qui conduisent à une représentation globale de la complexité et de la dynamique de ce système climatique. En spécialité Physique-Chimie, les élèves pourront approfondir leur compréhension des mécanismes en jeu en effectuant le bilan d’énergie du système Terre-atmosphère et en mettant en œuvre des démarches de modélisation.

La construction progressive d’un schéma bilan présentant les processus impliqués et leur interrelation est une façon d’arriver au schéma bilan proposé dans l’essentiel par l’image du chapitre.

Objectifs

- Faire la différence entre le climat et la météorologie.
- Connaître quelques indicateurs du climat global.
- Comprendre et expliquer le rôle des gaz à effet de serre dans le forçage radiatif.
- Expliquer les effets du réchauffement sur le système climatique terrestre.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- R. Delmas, S. Chauzy et al., *Atmosphère, océan et climat*, Belin Pour la science (2007).
- K. Johansen, B. Alfthan et al., *The andean glacier and water atlas – The impact of glacier retreat on water resources*, Unesco, GRID Arendal (2018). *Disponible et téléchargeable en accès gratuit sur la bibliothèque numérique UNESDOC*
- *Rapport spécial du GIEC sur le réchauffement planétaire de 1,5 °C*, GIEC (2019).

► Sites Internet

- Des dossiers en lien avec la météo et le climat : <http://education.meteofrance.fr/>
- Événements météorologiques extrêmes et changement climatique : <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=6009>
- Site du Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) pour des informations sur les pollens et leur risque allergène : <https://www.pollens.fr/le-reseau/les-pollens>
- Des données sur le Petit Âge glaciaire dans les Alpes (cours de Sylvain Coutterand, géomorphologue du CNRS) : <https://www.glaciers-climat.com/clg/petit-age-glaciaire>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ

p. 32

1. b
2. b
3. b
4. a

Activités

p. 34-41

Activité 1. La notion de climat

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d’élaboration
- **Commentaires sur l’activité**

Il s’agit de comprendre la différence entre climat et météorologie en étudiant les grandeurs atmos-

phériques et les échelles spatiales et temporelles prises en compte pour les étudier.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Pour repérer les grandeurs utilisées pour définir le climat, deux techniques sont possibles :

- la mesure (ou le repérage) en surface (pour la température, la pression, la pluviométrie, ...) qui se fait avec une station météorologique placée n'importe où sur Terre ;
- la mesure en altitude, depuis l'atmosphère avec des sondes ou depuis l'espace avec les satellites (pour la nébulosité, la circulation atmosphérique, la présence d'aérosols dans l'air, ...).

2. Les grandeurs mesurées ou repérées sont la température, la pression, la pluviométrie et la direction du vent. Les prévisions sont faites du jour pour le lendemain.

3. Les grandeurs prises en compte pour la définition du climat sont : la température, l'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité (ou l'ensoleillement).

Pour définir le climat les grandeurs sont mesurées sur de très larges zones à l'échelle d'un pays, d'un continent voire de la planète, et sur une durée d'au moins 30 ans. Pour les prévisions météorologiques les mesures sont faites quotidiennement et localement, souvent à l'échelle d'une région ou d'un pays.

Synthèse

Un climat se définit par la mesure d'un ensemble de grandeurs sur une zone géographique large et sur une durée assez longue (au moins 30 ans). La différence entre climat et météorologie réside essentiellement sur la durée de la prise en compte des grandeurs atmosphériques.

Activité 2. Le climat à différentes échelles de temps

- **Objectif :** Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration
- **Commentaires sur l'activité**

On étudie les indicateurs du climat en partant des indicateurs pour les périodes les plus grandes (de l'ordre de la centaine de milliers d'années) pour finir par ceux pour les périodes les plus courtes (de l'ordre de la dizaine d'années). On fait donc un focus dans le temps. Cette activité n'est pas un catalogue exhaustif des indicateurs climatiques, il s'agit davantage ici d'une occasion pour étudier les

méthodes scientifiques utilisées pour connaître le climat.

• **Corrigés du guide de travail**

1. On observe en Antarctique, par l'étude des gaz contenus dans les calottes, que tous les 100 000 ans environ il y a un réchauffement de plus de 2 °C suivi d'un épisode de refroidissement plus long allant jusqu'à -8 °C. Ces épisodes se sont répétés 4 fois en 400 000 ans à intervalles réguliers, on peut donc les considérer comme cycliques.

Remarque : l'aspect cyclique de ces phénomènes ne doit pas être utilisé pour nier la responsabilité anthropique du réchauffement climatique actuel, qui sera étudiée plus en détails dans les chapitres suivants. Au sein de cette activité, on peut montrer que le changement climatique se voit actuellement dans des échelles de temps très brèves (voir doc 4), ce qui n'était pas le cas auparavant.

2. On peut étudier les moraines pour savoir jusqu'où s'avançaient les glaciers et les pollens fossilisés pour connaître les végétaux qui étaient présents et faire le lien avec leurs préférences climatiques.

3. Depuis 1985, voire plus tôt pour certaines régions, les vendanges sont faites de plus en plus tôt. Cela signifie que les conditions de mûrissement du raisin sont plus rapidement atteintes et donc que le climat change vers un réchauffement. La date des vendanges est donc un très bon indicateur à court terme du climat.

Synthèse

Indicateur	Échelles des variations
Gaz contenus dans les glaces des calottes	Centaine de milliers d'années
Moraines	Siècle
Pollens	Millier d'années
Dates des vendanges	Dizaine d'années

Activité 3. Les effets des gaz à effet de serre

- **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement
- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité explicite l'effet des gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique. L'enjeu de la compréhension de ce phénomène est grand. En effet, par des grandeurs physiques mesurées, cette activité donne un poids scientifique à l'idée que la production de GES anthro-

priques entraîne un réchauffement atmosphérique par le biais d'une augmentation de l'effet de serre. Ce fait scientifique est à l'origine des politiques proposées pour diminuer l'impact de l'être humain sur le réchauffement climatique actuel.

• Corrigés du guide de travail

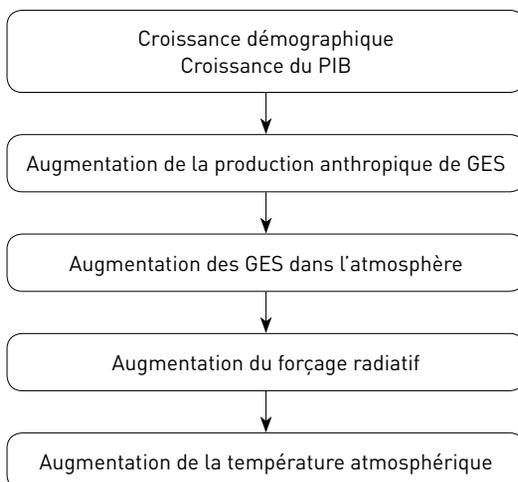
1. On observe que, globalement, la température et le taux de CO_2 suivent la même évolution depuis 1850.

2. On peut supposer que l'augmentation de la population et la croissance économique (visible par le PIB) n'ayant fait que croître depuis 1960, il a fallu produire plus, se déplacer plus et que l'augmentation de ces activités a donc généré d'autant plus de CO_2 . On peut donc émettre l'hypothèse qu'il y a une corrélation entre l'activité humaine et l'émission de gaz à effet de serre.

3. Ces trois gaz absorbent dans l'infra-rouge, ont un PRG important et ont une durée de séjour dans l'atmosphère assez importante. De plus d'après le doc 1, leur concentration croît dans l'atmosphère, augmentant ainsi leur potentiel de GES.

4. On observe que le forçage radiatif des GES ne fait qu'augmenter depuis 1950. Ceci signifie que le système terrestre n'est plus à l'équilibre : il gagne plus d'énergie qu'il n'en perd. Cet accroissement d'énergie entraîne un réchauffement climatique.

Synthèse



Activité 4. L'augmentation de la température de l'atmosphère

• **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• Commentaires sur l'activité

Au travers de cette activité sont mises en évidence les différentes rétroactions que différents réservoirs ont sur le réchauffement climatique. L'idée est d'arriver ici au schéma bilan de la page 43 : les effets de l'augmentation des GES sur le climat.

Les termes « rétroaction positive » et « rétroaction négative » n'ont pas été introduits dans cette activité, mais ils peuvent l'être en fonction du profil de la classe.

• Corrigés du guide de travail

1. La superficie des glaces diminue au niveau de l'arctique, ce qui se traduit par une baisse de l'albédo. La Terre absorbe alors plus de rayonnement solaire et en réémet plus sous la forme d'infra-rouge, ce qui augmente l'effet de serre et donc la température.

2. La fonte du permafrost entraîne une libération massive de méthane et de CO_2 , qui sont des gaz à effet de serre. Cela amplifie donc le réchauffement atmosphérique.

Remarque : la fonte du permafrost entraîne aussi la réactivation de bactéries décomposant la matière organique et qui rejettent du CO_2 .

3. $\Delta e = 2,6 \times 10^{-4} \times 1\,000 \times 0,6$

$\Delta e = 0,16$ m soit 16 cm.

4. La température atmosphérique augmente depuis plus de 50 ans, ceci entraîne la fonte des glaces partout sur la planète. Si la fonte des glaces océaniques ne fait pas augmenter le niveau de la mer, les glaces continentales se déversant dans les océans font monter le niveau de l'eau.

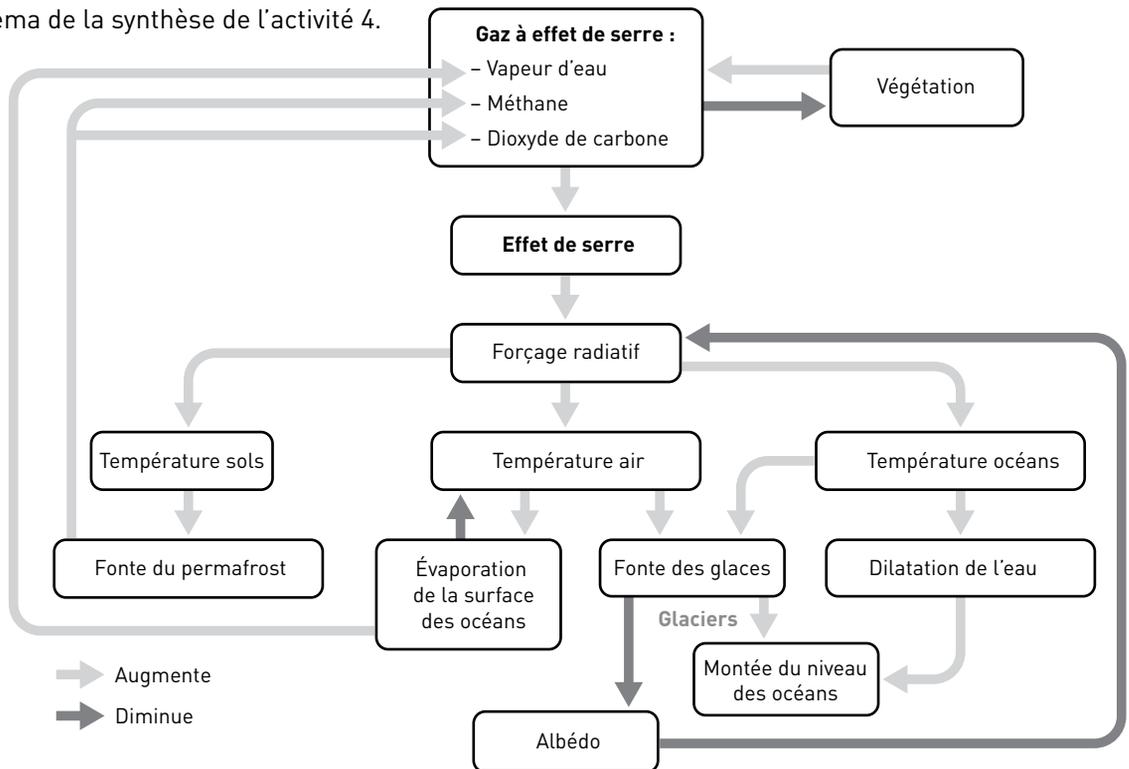
5. La végétation, par la photosynthèse qui fixe le CO_2 , fixe des GES et fait donc baisser la température atmosphérique. De même, l'océan absorbe 90 % de l'énergie accumulée dans le système Terre. De ce fait, il régule la température atmosphérique.

Remarque : cette activité n'évoque pas la propriété océanique de dissoudre une partie du CO_2 atmosphérique, évoquée dans le chapitre 3.

Synthèse

— Voir le schéma en haut de page suivante. —

► Schéma de la synthèse de l'activité 4.



Se tester p. 44

1. a. Faux b. Vrai c. Vrai
2. c
3. b et c
4. a et c
5. c et d
6. a et b

Travailler des compétences scientifiques p. 45

8. Organiser, effectuer et contrôler des calculs

1. Le volume des glaces terrestres qui devraient fondre équivaut à l'altitude maximum de ces îles multiplié par la surface marine mondiale (on omet la surface des îles, négligeable en rapport à la surface océanique globale).
 On calcule la surface $S_{\text{océans}}$ des océans terrestres.
 On sait que l'aire d'une sphère est de $4\pi r^2$ avec $r = 6\,370$ km pour la Terre.

Je calcule l'aire totale terrestre :
 $A_{\text{Terre}} = 4\pi \times (6\,370)^2 = 5,10 \times 10^8 \text{ km}^2$.
 Les océans représentent 70 % de cette surface.
 Je calcule la surface des océans :
 $S_{\text{océans}} = A_{\text{Terre}} \times 70\% = 5,10 \times 10^8 \times 0,7$
 $S_{\text{océans}} = 3,57 \times 10^8 \text{ km}^2$
 $V_{\text{glace}} = S_{\text{océans}} \times \text{altitude max des îles}$
 $V_{\text{glace}} = 3,57 \times 10^8 \times 5 \times 10^{-3}$
 $V_{\text{glace}} = 1,8 \times 10^6 \text{ km}^3$ de glaces à fondre
 2. Soit m la masse de glace à fondre. Elle est telle que : $m = V_{\text{glace}} \times \rho_{\text{glace}}$
 $V_{\text{glace}} = 1,8 \times 10^6 \times 10^9$ soit $V_{\text{glace}} = 1,8 \times 10^{15} \text{ m}^3$
 $m_{\text{glace}} = 1,8 \times 10^{15} \times 917$ soit $1\,650 \times 10^{15} \text{ kg}$ soit $1,7 \times 10^{15}$ tonnes.
 3. La durée de fonte Δt est donnée par la relation :
 $\Delta t = \frac{m}{v}$ où v est la vitesse de fonte.
 $\Delta t = \frac{1,65 \times 10^{15}}{252 \times 10^9}$ soit 6 500 ans.
 4. Dans ce calcul, le coefficient de dilatation thermique n'est pas pris en compte. De plus, l'île ne sera plus habitable bien avant d'être toute recouverte car la moindre dépression fera monter le niveau des mers.

Appliquer

p. 46

9. Les indicateurs du climat

1. Le climat se définit par la mesure d'un ensemble de grandeurs sur une large zone géographique et sur une durée assez longue (au moins 30 ans). La différence entre climat et météorologie réside essentiellement sur la durée de la prise en compte des grandeurs atmosphériques et l'échelle spatiale.

2. Les grandeurs météorologiques prises en compte pour définir le climat d'une région sont les températures (minimales en bleu et maximales en rouge), la pression (ligne isobare, de même pression, représentée en bleu avec les triangles), la direction et la force du vent (flèches et valeurs en violet), les précipitations et la nébulosité.

10. Les variations du climat

1. On observe deux épisodes chauds : entre le X^e et le XIV^e siècle (Optimum climatique médiéval) et actuellement (depuis le début du XX^e siècle). Le réchauffement actuel atteint des niveaux jamais atteints en 2 000 ans. On observe aussi une période de refroidissement entre 1550 et 1850 : le Petit Âge glaciaire.

2. Cette période est appelée Optimum climatique médiéval car, hormis le réchauffement climatique actuel, la température moyenne mondiale y est la plus élevée de ces 2 000 ans : elle ne descend pas en dessous de 12 °C et atteint même 15 °C.

11. Les engrais azotés et l'effet de serre

Le protoxyde d'azote absorbe les rayonnements dans l'infrarouge. Or un gaz qui absorbe dans l'infrarouge est un gaz à effet de serre. De plus, il a une grande durée de séjour dans l'atmosphère, 120 ans, ce qui augmente la durée de son action.

12. Les indicateurs du changement climatique

1. La cause commune principale des trois phénomènes est le réchauffement climatique qui entraîne une augmentation de la température moyenne sur la Terre.

2. Deux des causes de l'augmentation du niveau des océans sont la fonte des glaces continentales (glaciers) et la dilatation thermique des océans due à l'augmentation de la température.

S'entraîner

p. 47

13. Ça chauffe pour les Alpes

1. Graphiquement, on estime l'augmentation à +2 °C en 118 ans soit $1,7 \times 10^{-2}$ °C/an.

2. Graphiquement, on estime l'augmentation à +1,5 °C en 30 ans soit 5×10^{-2} °C/an.

3. On observe donc que le réchauffement climatique s'accélère ces 30 dernières années.

14. Le Petit Âge glaciaire

L'indicateur climatique utilisé ici est l'avancée ou le recul des glaciers (visibles par les moraines laissées).

On observe qu'entre 1300 et 1900, le glacier a avancé à 3 reprises plus loin qu'il ne l'avait fait auparavant, et ne s'est jamais beaucoup retiré. On observe dans le doc 1 que c'est en 1644 qu'il a été le plus avancé. Les glaciers avancent en période froide, d'où l'existence d'un Petit Âge glaciaire entre le XIV^e et le XIX^e siècle.

15. Une modélisation analogique

Des élèves se sont interrogés sur quelle glace (glacier ou banquise) est à l'origine de l'élévation du niveau des océans.

Ils ont utilisé deux cristallisoirs, un avec une roche représentant un continent sur lequel on met hors de l'eau un glaçon (comme un glacier), le second avec le glaçon dans l'eau. Tout est identique au départ : volume des glaçons, niveau de la mer, taille du cristallisoir. En effet, la seule variable doit être la localisation de la glace. Grâce à la règle, ils pourront repérer le cristallisoir dans lequel il y a eu une élévation du niveau de l'eau.

16. Reconstitution climatique grâce à l'étude des pollens

1. Temps 1 : beaucoup de chênes, beaucoup de conifères, peu d'herbacées : climat tempéré.

Temps 2 : beaucoup d'herbacées, un peu de conifères : climat froid.

Temps 3 : beaucoup de chênes, un peu de conifères : climat tempéré chaud.

2. Grâce à cet exemple on se rend compte que le climat a varié ces 100 000 dernières années : il est passé de tempéré à froid puis à tempéré chaud. On

associe le végétal produisant le pollen au climat où on trouve ces végétaux actuellement (principe d'actualisme) puis on peut ainsi retrouver le climat passé.

3. La méthode semble être très précise du point de vue de la chronologie relative. Néanmoins, pour qu'elle soit juste, il faut être certain de la vitesse et de la continuité de la sédimentation dans la zone de dépôt, du fait que le principe d'actualisme s'applique bien aux espèces étudiées (espèces pas trop généralistes, qui existent toujours...) et que les pollens n'aient pas été transportés sur de trop grandes distances car on se base sur leur proportion relative pour connaître l'écosystème à un temps t et en un lieu donnés.

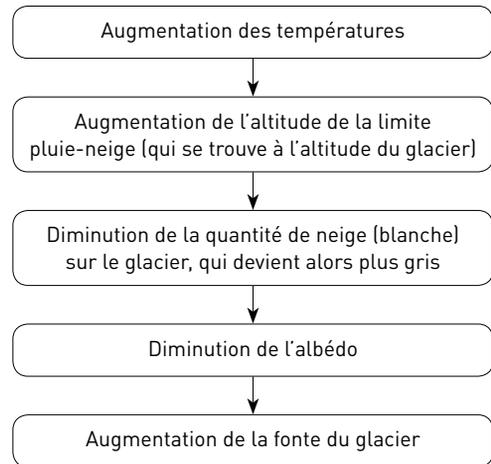
17. Augmentation des forçages radiatifs

1. L'augmentation du forçage radiatif est de $0,65\text{ °C}$ en 59 ans soit $1,1 \times 10^{-2}\text{ °C/an}$.

2. On voit que le forçage naturel est de 0 °C ($\pm 0,1\text{ °C}$) alors que le forçage anthropique cumulé atteint les $0,7\text{ °C}$ ($\pm 0,1\text{ °C}$). C'est donc manifestement les forçages anthropiques qui sont à l'origine du changement climatique.

18. Les causes et conséquences de la disparition du glacier Chacaltaya

1.



2.

$$h = \frac{h_{\text{total}}}{\text{nombre d'années}}$$

$$h = \frac{24\,000}{2007 - 1990}$$

$$h = 1\,400\text{ mm/an}$$

3. Cette disparition, comme celle des autres glaciers, aura une importance pour les Boliviens. En effet, 515 400 personnes sur 11 millions, soit 4,7 % de la population (en général des Quechuas pauvres), utilisent pour leur usage domestique de l'eau provenant de 40 à 100 % de la fonte des glaciers. De plus, plus de 400 000 hectares sur 36 828 000 hectares, soit 1,1 % des terres irriguées, le sont avec 40 à 100 % de l'eau provenant des glaciers. Ici aussi, ce sont en général des cultivateurs andins indigènes pauvres qui feront les frais de la disparition des glaciers, ce qui pourra augmenter l'exode vers les villes.

CHAPITRE 3 Le climat du futur

I. Introduction

Programme

L'analyse du système climatique, réalisée à l'aide de modèles numériques, repose sur des mesures et des calculs faisant appel à des lois physiques, chimiques, biologiques connues. Assorties d'hypothèses portant sur l'évolution de la production des gaz à effet de serre, les projections issues de ces modèles dessinent des fourchettes d'évolution du système climatique au XXI^e siècle.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Les modèles climatiques s'appuient sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ; - des méthodes numériques de résolution. <p>Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations <i>in situ</i> et spatiales ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats.</p> <p>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.</p>	<p>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.</p>
<p>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 : CO₂ produit par la combustion d'hydrocarbures, la déforestation, la production de ciment ; CH₄ produit par les fuites de gaz naturel, la fermentation dans les décharges, certaines activités agricoles.</p> <p>Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES :</p> <ul style="list-style-type: none"> - une augmentation de 1,5 à 5 °C de la température moyenne entre 2017 et la fin du XXI^e siècle ; - une élévation du niveau moyen des océans entre le début du XXI^e 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. 	<p>Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Les notions déjà connues sur la photosynthèse et les écosystèmes sont mobilisées. Les équations mathématiques utilisées dans les modèles climatiques ne sont pas évoquées.</p>	

Commentaires pédagogiques

Le système climatique ayant été construit dans sa globalité au chapitre 2, le chapitre 3 doit permettre aux élèves de découvrir selon quels principes il est possible de le modéliser. En sciences expérimentales, la démarche de modélisation occupe une place importante dans la formation des élèves et ceux-ci doivent comprendre, quel que soit leur parcours au sein du cycle terminal, qu'il est possible de mettre en équations un système pour décrire son évolution. L'enjeu est important car à partir du moment où l'on sait modéliser le système climatique, il va être possible de démontrer que l'augmentation de température constatée depuis le début de la Révolution industrielle s'explique entièrement par les rejets

anthropiques de gaz à effet de serre, dont on peut quantifier les émissions (activité 3). De plus, il devient possible de prévoir l'évolution du système dans le futur donc en particulier celle de la température globale selon les données initiales d'émissions de gaz à effet de serre introduites dans le modèle.

Au-delà de leur construction, abordée en vue d'une compréhension globale sans introduction de formalisme mathématique, la question de la validation des modèles est essentielle. Ainsi avant de prévoir le futur, un modèle doit permettre de prévoir le présent à partir du passé avec la plus grande fiabilité possible. On fera alors le constat que cette fiabilité s'accroît grâce à la progression de la connaissance du système climatique et aux progrès technologiques, notamment informatiques (activité 1).

L'utilisation d'un logiciel de simulation, ici SimClimat, permet de mettre en œuvre une véritable démarche scientifique rigoureuse qui mène à la démonstration de la responsabilité des GES dans l'augmentation de 1 °C de la température entre aujourd'hui et l'ère préindustrielle et permet de quantifier une rétroaction faisant intervenir l'albédo (activité 2). Il est important de faire remarquer aux élèves que les simulations engagées sont tout à fait semblables, dans une version bien entendue simplifiée, à celles menées par les scientifiques. Si les développements mathématiques et les calculs associés sont hors de portée, la démarche de validation de l'hypothèse de l'origine anthropique est, elle, totalement accessible aux élèves. Ce point est important car il contribue à renforcer chez les élèves la robustesse du consensus scientifique face à un climato-négationnisme encore présent.

Le modèle permet ensuite de travailler sur des prévisions d'évolutions climatiques possibles en se fondant sur la quantité de GES émis par les activités humaines, puisque désormais leur responsabilité est bien établie. Pour autant, il est important pour les élèves de distinguer que « prévision » n'est pas « prédiction » puisque plusieurs scénarios sont possibles et que les paramètres sont nombreux. Pour autant l'étude des conséquences climatiques montre que si l'ampleur des phénomènes est encore discutée, leur survenue est inéluctable (activité 3).

Enfin l'activité 4 aborde les effets du changement climatique sur les écosystèmes et la biodiversité, dont les élèves connaissent déjà la fragilité depuis le collège.

Ces deux dernières activités ne présentent pas de difficulté majeure en termes de compréhension et abordent des questions déjà soulevées dans les cours de sciences, voire dans d'autres disciplines (géographie par exemple). Néanmoins une vigilance s'impose vis-à-vis de deux attitudes d'élèves en réaction à l'étude des conséquences du réchauffement climatique. La première est un sentiment de lassitude de la part des élèves par rapport à une thématique déjà évoquée à plusieurs reprises dans leur parcours et par ailleurs très médiatisée. Ils pensent « déjà savoir ». La seconde, plus problématique encore, est la survenue d'une véritable éco-anxiété, encore appelée solastalgie, qui gagne les jeunes confrontés aux messages parfois très alarmistes sur l'avenir climatique de leur planète. Ces deux comportements questionnent l'impact de la formation que l'on dispense aux élèves. À la lassitude, l'approche scientifique développée dans ce chapitre doit apporter une réponse motivante par le complément de compréhension qu'elle fournit en s'appuyant sur ce que les élèves savent déjà afin d'aller plus loin. L'utilisation des logiciels de simulation est ici un levier de motivation supplémentaire en permettant l'implication des élèves dans une démarche scientifique de simulation réaliste. Au-delà de cette pratique motivante de la science, l'Enseignement scientifique est aussi un espace de prise de recul vis-à-vis du rôle de la connaissance scientifique dans nos sociétés comme cela est attendu à travers l'objectif « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement ». À l'anxiété générée par l'avenir incertain de nos sociétés, la science peut aussi apporter un regard optimiste et positif. Comprendre un risque c'est être en mesure de l'appréhender et de le quantifier afin de pouvoir l'atténuer et/ou de pouvoir s'y adapter. C'est tout l'enjeu des notions abordées au chapitre 4.

Objectifs

- Comprendre comment se sont construits les modèles climatiques.
- Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour déterminer les causes du réchauffement climatique.
- Faire des projections sur les climats du futur.
- Projeter les conséquences du changement climatique sur les écosystèmes.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- C. Maréchal, M.-A. Mélières, *Climats : passé, présent, futur*, Belin (2020).
- F. Vargas, *L'humanité en péril : viron de bord, toute !*, Gallimard (2019).

► Sites Internet

- Les scolytes et les changements climatiques : https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/insekten/wsl_buchdrucker_klimawandel/index_FR
- Les gaz à effet de serre : <http://les.cahiers-developpement-durable.be/outils/les-gaz-a-effet-de-serre/>
- En-roads, un logiciel de simulation sur le changement climatique : <https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html?v=2.7.15>
- Le dossier sur le climat de Météo France : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>
- Climat : les rétroactions, question clé de la sensibilité climatique : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-climat-retroactions-question-cle-sensibilite-climatique-1436/>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 50

1. b et c
2. a
3. b et c
4. a et c

Activités p. 52-59

Activité 1. La construction d'un modèle climatique

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration
- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet de comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration dans un contexte de modélisation du réel. Le réel est modélisé par des équations à partir de mesures et d'observations des grandeurs physiques, chimiques, biologiques, etc. Les équations sont ensuite résolues numériquement par discrétisation (de l'espace et du temps) à partir de scénarios et proposent des projections.

La fiabilité des modèles est testée par une confrontation aux données présentes, du passé proche ou bien plus ancien (paléoclimat).

Les modèles se sont améliorés depuis les années 1960 par une meilleure appréhension du réel, plus de données anciennes et actuelles et la puissance de calcul des ordinateurs.

• Corrigés du guide de travail

1. Les modèles climatiques couplent trois modèles (océanique, atmosphérique et terrestre). Le choix des grandeurs représentées modifie les composantes des différents modèles et aboutit à des modèles climatiques différents.

2. On ne considère que le maillage horizontal qui couvre la surface terrestre estimée à 510 000 000 km².

En 1980, les mailles mesuraient environ 500 km de côté, soit une aire au sol de 250 000 km². Il y avait

$$\text{donc } \frac{510\,000\,000}{250\,000} = 2\,040 \text{ mailles.}$$

En 2007, les mailles mesuraient environ 110 km de côté, soit une aire au sol de 12 100 km².

$$\text{Il y avait donc } \frac{510\,000\,000}{12\,100} = 42\,149 \text{ mailles.}$$

On peut donc en déduire que le modèle établi en 2007 est nettement plus précis que celui de 1980.

3. Les projections à 10 ans, 20 ans, etc., proposées par les modèles ne peuvent pas être comparées à des données d'observation actuelles. Pour évaluer la fiabilité des modèles, on effectue donc des projections de climats passés que l'on compare à des

données connues, issues de carottage par exemple.

4. Parmi les facteurs limitants l'amélioration des modèles climatiques, on peut citer :

- la compréhension des différentes composantes du système climatique ;
- la mise en équation de ces composantes et de leurs interactions ;
- l'acquisition de données actuelles et passées sur le climat ;
- la puissance de calcul des ordinateurs.

Synthèse

Les modèles climatiques illustrent bien le mode de construction en sciences. Ils se sont affinés au fur et à mesure de l'évolution des techniques (puissance de calcul des ordinateurs) et des connaissances (compréhension plus fine des composantes du système Terre qui fait que de plus en plus de paramètres sont pris en compte dans les modèles). Les résultats obtenus par les modèles sont confrontés à la réalité, en vérifiant si les résultats obtenus par les modèles correspondent bien aux données observées et mesurées ces dernières années, voire sur des échelles de temps beaucoup plus longues pour les paléoclimats. Une fois la fiabilité des modèles évaluée, ils peuvent alors être utilisés pour faire des projections sur le climat du futur. Les modèles climatiques sont le fruit d'une conception collective, car ils intègrent des données scientifiques liées à des facteurs physico-chimiques et/ou biologiques qui sont reliés par des équations mathématiques. Ces modèles tiennent compte des quatre enveloppes de la terre : l'atmosphère, les océans, la surface terrestre et la biosphère. Des dizaines de modèles climatiques existent dans le monde, mais malgré quelques petites différences ils aboutissent tous aux mêmes tendances de résultats.

Activité 2. Modèles climatiques et activités humaines

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

Dans cette activité, il s'agit d'identifier les sources de GES et d'étudier l'impact des activités humaines sur le réchauffement climatique. C'est l'occasion d'utiliser des logiciels de simulation pour modéliser l'effet de réchauffement causé par les GES d'origine naturelle et anthropique ou pour étudier

les rétroactions. L'utilisation des logiciels de simulation permet de mettre en œuvre des démarches expérimentales de modélisation et donc de répondre à l'objectif « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » du programme.

• Corrigés du guide de travail

1. Les transformations chimiques qui produisent du CO_2 sont les combustions de la matière organique (les combustibles fossiles). La fabrication du ciment, la déforestation et la fermentation des déchets dans les décharges produisent également du CO_2 . Il existe des transformations qui produisent d'autres GES comme la fermentation élaborée par les ruminants et leurs déjections, la dégradation des matières organiques dans les décharges et les fuites de gaz naturel à l'origine de rejets de méthane dans l'atmosphère.

2. Lorsque la concentration atmosphérique en CO_2 se maintient à 280 ppm (concentration dite naturelle, sans implication de l'être humain), la température se maintient à 14,4 °C. Cette situation représente le témoin.

Si on fait passer la valeur initiale à la valeur réelle actuelle de 380 ppm en 2020, on observe une augmentation de la température jusqu'à 15,4 °C en 2020, ce qui est conforme avec la température moyenne observée actuellement et à l'augmentation de température de 1 °C constatée depuis l'ère préindustrielle.

Cela confirme que la température actuelle s'explique par la concentration actuelle de GES et notamment de CO_2 dans l'atmosphère.

Remarque : cette expérience prend en compte seulement le CO_2 , mais on montre ainsi sa forte contribution dans l'augmentation anthropique.

3. On sait que l'élévation de température cause une fonte des glaces qui à son tour modifie l'albédo en le faisant diminuer. Si on compare grâce au modèle une situation témoin où l'albédo est constant (courbes rouges) avec une situation où l'albédo évolue en fonction de la température (courbes violettes), on observe en conséquence une augmentation plus importante de la température lorsque l'albédo diminue. Ainsi l'augmentation de température exerce un effet sur l'albédo qui renforce à son tour l'augmentation de température. Il s'agit d'un effet amplificateur, également appelé rétroaction positive.

4. Les forêts étant de gigantesques puits de carbone par le biais de la photosynthèse, leur destruction par les feux à cause du réchauffement

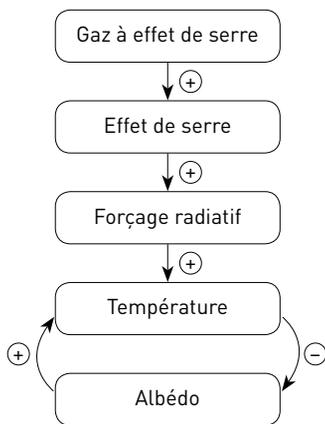
climatique relâche dans l'atmosphère de grandes quantités de CO₂ et diminue aussi les possibilités de stockage de carbone du fait que les surfaces végétales se réduiraient.

5. Il existe des limites à ces simulations par rapport à la situation réelle parce qu'elles ne prennent pas en compte l'effet de certains facteurs qui peuvent amplifier le réchauffement climatique comme la vapeur d'eau liée aux aérosols et l'état des sols sur les échelles de temps courtes (saisons, années). Certains paramètres rentrés par l'utilisateur peuvent ne pas correspondre précisément à la situation réelle, par exemple l'augmentation de la concentration en CO₂ ne s'est pas faite de manière linéaire entre 1750 et 2020.

En dépit de tous les aléas de ces modèles, leur apport est important car ils montrent l'impact des comportements humains sur le réchauffement climatique et les choix de société que nous devons adopter pour laisser une Terre durable aux générations futures.

Remarque : il faut également garder à l'esprit que Simclimat propose une modélisation très simplifiée du climat de la planète, et que les modèles climatiques utilisés par les laboratoires sont beaucoup plus précis.

Synthèse



Activité 3. Les évolutions possibles du climat

- **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement
- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité aborde trois conséquences de la hausse future des températures : l'élévation du niveau moyen des océans, l'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques

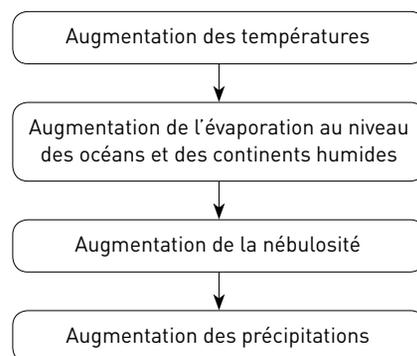
extrêmes et l'augmentation de l'intensité des précipitations. Ces points sont traités selon deux scénarios du GIEC : si les émissions des GES cessent, et si la croissance de quantité de GES émis se poursuit comme actuellement. L'activité 3, tout comme l'activité 4, permet donc de répondre à l'objectif « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement » du programme.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Dans le modèle 1, on cesse dès aujourd'hui d'émettre des GES alors que dans le modèle 2, les rejets des GES sont poursuivis au même rythme qu'actuellement. Dans les deux modèles, la température continue d'augmenter jusqu'en 2100, de +1 °C pour le modèle 1 (±0,7 °C) et +3,7 °C (±1,3 °C) pour le modèle 2. Le niveau de la mer augmente également dans les deux modèles, +0,4 m (±0,15 m) dans le modèle 1 et +0,63 m (±0,2 m) dans le modèle 2. On peut considérer que ces augmentations sont inéluctables puisqu'elles ont lieu même si on arrête dès à présent d'émettre des GES. La politique choisie pour l'émission de GES permettra uniquement de limiter ces augmentations.

2. D'après le modèle, on observe que quelle que soit l'hypothèse choisie (1 ou 2), la fréquence des canicules, leur intensité et leur durée augmenteront en 2050. De même, on observe actuellement que le nombre d'épisodes de pluies importantes est déjà en augmentation en Méditerranée par rapport aux années 1961-1990 et que les disparités de précipitations dans le monde seront augmentées d'ici 2100. Néanmoins dans les deux cas (augmentation de la durée et de l'importance des canicules et augmentation des pluies extrêmes), l'augmentation sera plus importante dans le cas de l'hypothèse 2, avec des émissions de GES qui restent identiques aux émissions actuelles.

3.



Synthèse

Quelle que soit l'hypothèse choisie (arrêt de toute activité génératrice de GES ou poursuite de la production de GES anthropique comme actuellement), la température mondiale augmentera d'ici 2100. Quelques conséquences de cela seront une augmentation du niveau des océans et une plus grande occurrence des phénomènes météorologiques extrêmes qui seront plus intenses (canicules, précipitations).

Le seul moyen de minorer l'intensité de ces phénomènes est de limiter le rejet des GES. L'être humain peut donc agir sur cette augmentation.

Activité 4. Le changement climatique et les écosystèmes

- **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet aux élèves de comprendre les conséquences du changement climatique sur les écosystèmes. Bien qu'en grande partie naturaliste, elle fait intervenir des processus chimiques.

Pour l'exemple des coraux, il faut bien faire la distinction entre la conséquence liée au réchauffement climatique (le blanchissement des coraux) qui se passe dans les eaux chaudes, et la conséquence liée à l'acidification des océans (la difficulté à construire un squelette) qui se passe dans les eaux froides.

- **Corrigés du guide de travail**

1. La hausse de la température entraîne l'expulsion des algues qui étaient hébergées par les coraux en échange de matière organique. Si le réchauffement se poursuit, les coraux qui ont perdu une source nutritive dépérissent puis meurent.

2. D'après la distribution des espèces carbonées dissoutes en fonction du pH, on remarque que l'espèce CO_2 n'existe qu'en milieu acide. Lorsque le CO_2 se dissout dans les océans, le pH de l'eau diminue. Il y a donc acidification des océans.

Quand le pH de l'eau diminue, on remarque que la quantité d'ions carbonate CO_3^{2-} dissous diminue. Les coraux d'eau froide construisent leur squelette de calcaire à partir d'ions Ca^{2+} et d'ions CO_3^{2-} qu'ils prélèvent dans l'eau de mer. Il est donc compliqué pour les coraux de construire leur squelette calcaire. Il leur est d'autant plus dur de

fabriquer leur squelette que l'eau est plus froide, la solubilité du CO_2 dans l'eau augmentant lorsque la température diminue.

3. La température a un effet sur la survie de la chenille processionnaire qui ne survit pas à une température de moins de -16 °C et qui ne peut pas se nourrir en deçà de certaines températures (9 °C le jour et 0 °C la nuit). Or, si le climat se réchauffe, l'aire des régions dont les températures sont supportables augmente en direction du nord-est. Le problème est qu'elles sont urticantes et allergènes et sont un véritable fléau pour les régions où les pins sont abondants.

4. 1/5 des espèces sont menacées par le réchauffement climatique à cause de la disparition de leurs habitats. Ainsi, la montée des eaux et l'augmentation des tempêtes ont détruit l'habitat du rat à queue mosaïque, première espèce de mammifère officiellement disparue à cause du réchauffement climatique. On pourrait aussi parler de la catastrophe écologique majeure provoquée par les incendies gigantesques suite aux périodes chaudes et sèches qui sont de plus en plus fréquentes (incendies en Australie fin 2019).

Synthèse

Les conditions du milieu évoluent du fait du changement climatique : acidification des océans, augmentation des tempêtes, niveau de l'océan qui monte, jours de grand froid moins fréquents.

Certaines espèces sont victimes de ces phénomènes : blanchissement des coraux d'eau chaude du fait de l'augmentation de la température océanique, acidification des océans compliquant la formation de calcaire utilisé par les coraux d'eau froide pour leurs squelettes, montée des océans et disparition de certaines espèces (rat à queue mosaïque). *A contrario*, le réchauffement climatique est profitable à certaines espèces opportunistes qui voient leur aire de répartition s'étendre, ce qui a parfois des conséquences pour la santé publique.

Se tester

p. 62

- 1. a** : Modélisation
b : Projection
c : Données de terrain
d : Maillage
e : Scénario climatique
- 2. a** : puits

b : source

c : puits

d : source

e : source

f : source

g : puits

3. a

4. b, c et d

5. a

6. a, c et d

Travailler des compétences scientifiques

p. 63

8. Analyser un graphique

Ce graphique présente les anomalies de température et la concentration en CO₂ en fonction du temps, de 1880 à 2015.

On observe que dès 1950 il y a une augmentation très importante du taux de dioxyde de carbone qui s'accompagne d'une hausse de température. L'élévation significative de ce gaz à effet de serre à partir de 1950 est directement liée aux activités humaines d'où l'expression de Jacques Chirac : « Notre maison brûle et nous regardons ailleurs ». On voit sur le graphique que le taux de CO₂ a continué d'augmenter depuis 2002, toujours accompagné d'une hausse de température, ce qui signifie soit qu'il n'y a pas eu de mesures pour réduire l'émission de CO₂ dans l'atmosphère, soit qu'elles n'ont pas été efficaces. La phrase de Jacques Chirac est donc toujours d'actualité.

Appliquer

p. 64

9. Un maillage horizontal

1. On ne considère que le maillage horizontal qui couvre la surface terrestre estimée à 510 000 000 km².

En 1995, les mailles mesuraient environ 250 km de côté, soit une aire au sol de 62 500 km². Il y avait

donc $\frac{510\,000\,000}{62\,500} = 8\,160$ mailles.

2. Pour augmenter la précision du modèle, il faut augmenter le nombre de mailles, c'est-à-dire diminuer leur taille. Le facteur limitant est la puissance de calcul des ordinateurs.

10. Des journées chaudes

1. L'hypothèse d'émissions réduites de CO₂ d'ici 2100 permettrait de maintenir à 30 % la fréquence des jours anormalement chauds tandis que l'hypothèse d'émissions de ce GES au même rythme qu'actuellement ferait augmenter la fréquence de manière très inquiétante (environ 60 %).

2. L'être humain, par ses activités, peut abaisser ou augmenter la fréquence des événements météorologiques extrêmes puisque des mesures de réduction d'émissions de CO₂ d'ici 2100 réduiraient de 30 % (60 % - 30 %) la fréquence des journées anormalement chaudes.

11. Le moustique tigre

1. Le moustique tigre est un animal qui vit normalement dans les régions chaudes. Il a été introduit en France en 2004 dans une zone restreinte du Sud-Est. En 2018, tout le sud de la France est affecté par la progression de ce moustique ainsi que des régions du nord à partir de 2015. Une telle répartition du moustique tigre en France, ne peut s'expliquer que par un réchauffement climatique.

2. Ce changement d'aire de répartition a des conséquences pour la santé publique car ce moustique est vecteur d'agents infectieux viraux à l'origine de maladies très graves.

S'entraîner

p. 65-66

12. Incendies en Australie

1. D'après les données du graphique, la principale source d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère pour l'Australie est due au commerce du gaz et du charbon (exploitation, transport, ...) avec 1 200 millions de tonnes.

2. On constate que pour une petite période de cinq mois (septembre 2019 à janvier 2020) les incendies en Australie ont provoqué l'émission d'une quantité de CO₂ équivalente à celle des 116 pays les moins émetteurs pour toute l'année 2018, soit un peu plus de 400 millions de tonnes. Les émissions de CO₂ dues à ces incendies sont presque équivalentes aux émissions annuelles de pays développés comme le Royaume-Uni ou l'Australie, ou encore aux incendies en Amazonie pour toute l'année 2019. La quantité de CO₂ émise, dans un laps de temps très court, est donc considérable.

3. Impacts des incendies sur les écosystèmes australiens :

- disparition de l'habitat pour de très nombreuses espèces vivantes. En effet près de 8,4 millions d'hectares de végétation ont été réduits en cendres (c'est l'équivalent de la surface de l'Autriche), et 80 % des forêts autour de Sydney auraient également disparu ;
- mort de plus d'un milliard et vingt-cinq millions d'animaux.

Remarque : ces incendies ont aussi dispersé dans l'air des particules fines issues des combustions. Ces particules polluantes vont impacter les êtres vivants.

13. L'acidification des océans

1. La dissolution du CO_2 atmosphérique dans les océans entraîne une diminution du pH donc une acidification des océans. Le diagramme de distribution des espèces carbonées dissoutes nous montre que si le pH diminue, le pourcentage d'ions CO_3^{2-} dans les océans diminue alors que ceux-ci sont indispensables à la calcification de tous les organismes à squelette externe.

2. Comme le montre le tableau des solubilités, la solubilité du CO_2 est plus importante dans l'eau froide que dans l'eau chaude. Ce phénomène sera donc plus important dans les mers froides.

3. L'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère entraîne une augmentation de l'acidification des océans (ce qui limite la production de carbonate de calcium pour les coraux et coquillages). Néanmoins, cette augmentation de température va entraîner aussi une augmentation de la température des océans et devrait provoquer une diminution de la solubilité du CO_2 . Ce pourrait être bénéfique pour la calcification des coraux d'eau froide.

Remarque : les coraux en eau froide vivent en profondeur, cette diminution de la solubilité du CO_2 liée à l'augmentation de la température des océans n'aura peut-être pas d'effet significatif.

14. Un changement de capitale

1. Jakarta est traversée par de nombreux cours d'eau lesquels sont bordés de zones inondables, notamment Jakarta nord-ouest et sud. Avec le réchauffement climatique, l'élévation du niveau

moyen des océans et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des pluies, ces inondations sont amenées à s'intensifier.

2. La disparition de la forêt primaire de Bornéo serait un dommage collatéral du réchauffement climatique. En effet, pour accueillir les 10 millions d'habitants de la capitale, il faudra encore plus raser la forêt, qui avait déjà subi une déforestation intensive pour implanter des cultures d'huile de palme. Cela se fera au détriment de la grande biodiversité abritée par la forêt.

15. La fabrication du ciment

1. Le document mentionne la nécessité de broyer les matières premières, calcaire et argile, de les porter à très haute température et de broyer le produit obtenu. Toutes ces opérations ainsi que les trois transformations chimiques sont coûteuses en énergie.

2. Le texte mentionne une émission de 0,7 tonne de CO_2 par tonne de ciment produit. Sachant qu'en une année la production mondiale de ciment est proche de 3,5 Gt on aura pour l'émission de CO_2 :

$$m_{\text{CO}_2} = 0,7 \times 3,5 \times 10^9 \text{ soit } m_{\text{CO}_2} = 2,5 \times 10^9 \text{ t} = 2,5 \text{ Gt.}$$

3. Pour calculer la masse m de calcaire nécessaire à la production annuelle de ciment dans le monde, il faut utiliser la relation suivante :

$m = n_{\text{CaCO}_3} \times M_{\text{CaCO}_3}$ avec n_{CaCO_3} la quantité de matière de CaCO_3 consommé et M_{CaCO_3} la masse d'une mole de calcaire.

Cherchons la relation entre la quantité de matière de calcaire consommé n_{CaCO_3} et la quantité de matière de dioxyde de carbone émis n_{CO_2} . D'après l'équation de réaction $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca} + \text{CO}_2$, on remarque que la consommation d'une mole de calcaire entraîne la formation d'une mole de dioxyde de carbone donc $n_{\text{CaCO}_3} = n_{\text{CO}_2}$.

$$\text{Or } n_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}}$$

On aura donc pour le calcul de la masse de calcaire :

$$m = n_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CaCO}_3}$$

$$m = \frac{m_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}}$$

$$\text{Donc } m = \frac{2,5 \times 100}{44} \text{ soit } m = 5,7 \text{ Gt.}$$

5,7 Gt est une très grande valeur, la demande en calcaire pour les cimenteries est très importante.

16. Les scolytes et les changements climatiques

En hiver, il y a davantage d'arbres qui tombent du fait d'une hausse de la fréquence des tempêtes. Les scolytes s'attaquent à l'écorce de ces arbres dont ils se nourrissent et où ils se reproduisent. Ils peuvent aussi s'attaquer aux arbres vivants en cas de sécheresse parce que ces derniers s'affaiblissent (doc 1). Par ailleurs, le nombre de générations de scolytes est fonction de la température : s'il fait froid, il y a environ une génération et jusqu'à 3 générations s'il fait chaud (doc 2).

Dans les Alpes et le Jura, régions de haute altitude contrairement au plateau suisse, il y a davantage d'épicéas et moins de scolytes (doc 3). Si les températures venaient à augmenter, les épicéas, arbres de prédilection des scolytes mais sensibles à la sécheresse, pourraient se raréfier alors même que le nombre de scolytes pourrait augmenter (docs 2 et 3).

À terme, un réchauffement climatique pourrait donc mettre en péril l'ensemble de l'écosystème forestier suisse.

17. Planter des arbres

Impact de la déforestation : débutée en 2020, la déforestation entraîne une hausse d'environ 3 Gt (7 Gt – 4 Gt) alors que si elle débutait en 2050, les émissions de CO₂ seraient moins importantes (2 Gt). Cette simulation montre l'impact des forêts sur les émissions de CO₂ et permet d'émettre l'hypothèse qu'un arrêt de la déforestation aurait des effets bénéfiques sur les GES.

Impact du reboisement : on voit qu'un reboisement de 1 % débuté en 2020 conduit à une réduction d'environ 1,3 Gt de CO₂ et de seulement 0,8 Gt pour un reboisement débuté en 2050. Ainsi, plus tôt on débutera le reboisement de la surface terrestre et on arrêtera la déforestation et moins il y aura d'émissions de CO₂.

Erratum : pour le schéma « Impact de la déforestation », la légende indique « Réduction de la déforestation » alors qu'il s'agit d'une réduction de la surface forestière due à la déforestation. L'erreur a été corrigée sur les réimpressions.

CHAPITRE 4 Énergie, choix de développement et futur climatique

I. Introduction

Programme

La consommation mondiale d'énergie fait majoritairement appel aux combustibles fossiles, principale cause du réchauffement climatique. Il est donc essentiel d'identifier, pour toute activité, individuelle ou collective, ou tout produit, l'impact sur la production de gaz à effet de serre. L'identification d'autres effets collatéraux, notamment sur la santé, est importante. Les différents scénarios de l'évolution globale du climat dépendent des stratégies que l'humanité mettra en œuvre.

Savoirs	Savoir-faire
<p>L'énergie utilisée dans le monde provient d'une diversité de ressources parmi lesquelles les combustibles fossiles dominent. La consommation en est très inégalement répartie selon la richesse des pays et des individus.</p> <p>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.</p> <p>En moyenne mondiale, 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.</p> <p>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).</p>	<p>Utiliser les différentes unités d'énergie employées (Tonne Équivalent Pétrole (TEP), kWh...) et les convertir en joules – les facteurs de conversion étant fournis.</p> <p>Exploiter des données de production et d'utilisation d'énergie à différentes échelles (mondiale, nationale, individuelle...).</p> <p>Comparer quelques ordres de grandeur d'énergie et de puissance : corps humain, objets du quotidien, centrale électrique, flux radiatif solaire...</p>
<p>La combustion de carburants fossiles et de biomasse libère du dioxyde de carbone et également des aérosols et d'autres substances (N₂O, O₃, suies, produits soufrés), qui affectent la qualité de l'air respiré et la santé.</p>	<p>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, telles les particules fines résultant de combustions.</p>
<p>L'empreinte carbone d'une activité ou d'une personne est la masse de CO₂ produite directement ou indirectement par sa consommation d'énergie et/ou de matière première.</p>	<p>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.</p>
<p>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.</p> <p>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.</p>	<p>Analyser l'impact de l'augmentation du CO₂ sur le développement de la végétation.</p> <p>Analyser des extraits de documents du GIEC ou d'accords internationaux proposant différents scénarios.</p>
<p>Prérequis et limites Les notions de formes et de transfert d'énergie, ainsi que celle de puissance, déjà connues, sont mobilisées. La notion de risques naturels étudiée au collège et en classe de seconde (SVT) est convoquée.</p>	

Commentaires pédagogiques

Le chapitre 4 porte sur les ressources d'énergie, l'empreinte carbone des combustibles fossiles et ses conséquences sur la santé et le climat, puis la transition écologique. Ce chapitre traite davantage des quantités d'énergie considérables mises en jeu au quotidien dans le monde que du concept d'énergie étudié dans un chapitre ultérieur. Deux parties de ce chapitre sont abordées sous forme d'études documentaires et l'articulation entre ces deux parties se fait de façon plus calculatoire.

Les activités 1 et 2 abordent les différentes ressources d'énergie primaire, disponibles sous forme de stocks ou de flux. Avec la notion de flux, la relation entre puissance et énergie déjà abordée au cycle 4 est réinvestie. Les données sur les énergies doivent amener les élèves à prendre conscience des quantités gigantesques des énergies produites et consommées, et notamment en combustibles fossiles, des secteurs d'activités utilisateurs d'énergie, et de l'inégalité des populations dans le monde à l'accès à l'énergie. Le joule, unité de base d'énergie, étant peu adapté à ces valeurs, le kilowattheure (vu au cycle 4) et la tonne d'équivalent pétrole sont utilisés.

Les activités 3 et 4 font le lien entre les activités 1 et 2 et l'activité 5. L'activité 3 est consacrée aux combustions complètes et incomplètes des carburants fossiles et de la biomasse avec des conséquences :

- sur la santé par des polluants (CO , oxydes d'azote : $\text{NO} + \text{NO}_2$, SO_2 , particules fines...);
- sur l'atmosphère avec les gaz à effet de serre (CO_2 , N_2O ...).

Les équations ajustées des réactions modélisant ces combustions sont données aux élèves afin qu'ils puissent calculer les masses de CO_2 produit, et qu'ils soient sensibilisés aux valeurs importantes déterminées pour une quantité d'énergie donnée. Dans cette partie du programme, déjà traitée en chimie en classe de seconde, les professeurs veilleront à ne pas employer le terme de « masse molaire » qui n'est connu que des élèves qui ont suivi la spécialité de physique chimie en 1^{re}. L'empreinte carbone d'une activité ou d'une personne est définie et les impacts d'objets quotidiens sont comparés suivant leur cycle de vie (activité 4). L'activité 4 permet aussi de faire réfléchir les élèves sur la relation entre une responsabilité individuelle et son intégration au sein d'une responsabilité collective. Il est toutefois important d'éviter les approches trop anxieuses et montrer que des modifications de comportement simples et accessibles à tous permettent d'agir positivement sur les questions de besoins énergétiques et indirectement de santé publique.

L'activité 5 concerne la transition écologique avec l'étude des différents scénarios sur les hypothèses des quantités de gaz à effet de serre émis et le réchauffement climatique. Elle est ainsi l'occasion de remobiliser la notion de risque connue des élèves depuis le cycle 4 et qui est au cœur des problématiques qui se posent à nos sociétés face au changement climatique. En fixant quatre trajectoires d'émissions, les scientifiques du GIEC déduisent, grâce aux modèles, quatre projections climatiques reprises par des spécialistes des sciences humaines pour construire quatre scénarios d'évolution de nos sociétés. En Enseignement scientifique, seules les stratégies d'adaptation visant à réduire la vulnérabilité associée aux enjeux identifiés (écosystèmes, agrosystèmes, sociétés humaines, etc.) sont illustrées. Elles sont approfondies en enseignement de spécialité SVT de terminale et complétées par l'étude des stratégies d'atténuation, plus complexes et en lien avec les choix politiques au niveau international.

Objectifs

- Savoir d'où vient et comment est consommée l'énergie dans le monde.
- Savoir que les combustions libèrent des substances qui affectent la santé.
- Connaître l'impact de différentes activités sur l'empreinte carbone.
- Connaître l'intérêt des scénarios de transition énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- C. Seigneur, *Pollution atmosphérique : concepts, théorie et applications*, Belin (2018).
- F. Boutaric, *Pollution atmosphérique et action publique*, Rue d'Ulm (2014).
- P. Arquès, *L'air ? L'eau ? L'énergie ? La pollution ? La vie !*, Hermann (2011).
- O. Blond, *Respirez ! Solutions pour lutter contre la pollution de l'air*, Eyrolles (2019).

► Sites Internet

- Évaluation des risques de la pollution urbaine sur la santé en Ile-de-France : <https://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-sante>
- Adoption de l'accord de Paris : <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/fre/l09f.pdf>
- Rapport Spécial du GIEC Réchauffement à 1,5 °C, résumé à destination des enseignants : http://www.oce.global/sites/default/files/2019-04/1.5degree_FR_final_LR.pdf
- Le GIEC et ses scénarios, par l'Ademe : <https://www.ademe.fr/expertises/changement-climatique/quoi-parle-t/giec-scenarios>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 68

1. b et c
2. a
3. a
4. c

Activités p. 70-77

Activité 1. Les ressources d'énergie

• **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

Dans cette activité, les élèves doivent prendre conscience que la consommation mondiale en énergie est gigantesque et qu'il est plus judicieux d'utiliser d'autres unités que le joule, unité de base du système international. L'énergie consommée est corrélée au niveau de vie des pays avec un taux de combustibles fossiles très élevé.

• **Corrigés du guide de travail**

1. D'après le doc 2, la consommation mondiale d'énergie est de 13 511,2 Mtep, ce qui correspond à $1,35112 \times 10^{10}$ tep ou $1,35112 \times 10^{10} \times 4,18 \times 10^{10}$ J soit $5,65 \times 10^{20}$ J.

Cette valeur étant très élevée, on utilise des unités mieux adaptées comme la tonne d'équivalent pétrole (tep) ou le kilowattheure.

2. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont des combustibles fossiles. Ils représentent 23,4 + 34,2 + 27,6 soit 85,2 % de l'énergie totale consommée.

3. Les combustibles fossiles ont deux inconvénients majeurs :

- ils sont limités en stocks car non renouvelables ;
- Ils libèrent une grande quantité de gaz à effet de serre qui affectent le climat.

4. On remarque sur le doc 3 qu'en 2013 les pays représentés en rouge sur la carte, c'est-à-dire les pays d'Amérique du Nord, d'Europe, d'Asie du Nord et l'Australie sont les plus gros consommateurs d'énergie par habitant. Ceux représentés en jaune sur la carte, comme les pays d'Afrique et d'Asie du Sud, sont ceux qui consomment le moins d'énergie par habitant. La consommation d'énergie par habitant est liée au niveau de vie des habitants de ces pays.

Synthèse

Les deux gros défis qui semblent devoir être relevés sont le développement de nouvelles sources d'énergie pour se passer des combustibles fossiles et apporter une plus grande égalité mondiale à l'égard de l'accès à l'énergie.

Activité 2. La consommation d'énergie

• **Objectifs** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques. Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

Dans l'activité sont abordés :

- les principaux secteurs de consommation d'énergie ;
- la production d'énergie primaire par pays et la consommation d'énergie par habitant ;
- l'énergie consommée par différents objets calculée à partir de la relation entre énergie et puissance.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Les trois principaux secteurs consommateurs d'énergie sont le tertiaire et le résidentiel (42 %), les transports (30 %) et l'industrie (25 %).

2. En 2015, d'après le doc 2, la Chine a produit beaucoup plus d'énergie primaire que la France (2 525 Mtep contre 135 Mtep). En revanche, un habitant de Chine consomme moins d'énergie primaire qu'un habitant en France (équivalent de 6 kg de pétrole contre 10 pour un Français). D'une part, le nombre d'habitants dans chaque pays explique la différence de production d'énergie (1,3 milliard d'habitants en Chine et 65 millions en France). D'autre part, un Français a un niveau de vie plus élevé qu'un Chinois, ce qui explique la différence de l'énergie consommée par habitant.

3. On utilise la relation donnée dans le doc 3 :

$$E = P \times \Delta t \text{ avec } \Delta t = 3\,600 \text{ s.}$$

Objet	Puissance	Énergie
Un smartphone	2 W	$7,2 \times 10^3 \text{ J}$ ou 7,2 kJ
Une lampe	15 W	$5,4 \times 10^4 \text{ J}$ ou 54 kJ
Le corps humain	100 W	$3,6 \times 10^5 \text{ J}$ ou 360 kJ
Une voiture électrique	8 kW	$2,9 \times 10^7 \text{ J}$ ou 29 MJ
Le réacteur d'une centrale nucléaire	800 MW	$2,9 \times 10^{12} \text{ J}$
Flux radiatif solaire reçu sur Terre	$1,7 \times 10^{17} \text{ W}$	$6,1 \times 10^{20} \text{ J}$

4. Il faut 36 MJ pour qu'une voiture électrique parcoure 100 km. Un réacteur nucléaire, en une heure, produit une énergie de $2,9 \times 10^{12} \text{ J}$.

Le nombre de kilomètres parcourus par une voiture électrique alimentée par l'énergie produite en une heure par un réacteur de centrale nucléaire équivaut à l'énergie produite par le réacteur divisée par l'énergie consommée par la voiture électrique pour 100 km, multipliée par 100 km.

$$\text{Nombre de kilomètres parcourus} = \frac{2,9 \times 10^{12}}{36 \times 10^6} \times 100 \text{ soit } 8,1 \times 10^6 \text{ km.}$$

L'énergie produite par un réacteur de centrale nucléaire est donc considérable.

Synthèse

Il est nécessaire de connaître et de comparer les productions et consommations d'énergie pour :

- adapter la production à la consommation ;
- connaître les secteurs les plus gros consommateurs d'énergie afin de porter plus particulièrement des efforts d'économie d'énergie sur ces secteurs.

Activité 3. Combustions, dioxyde de carbone et polluants

• **Objectifs :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques. Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

Les activités humaines quotidiennes, industrielles ou agricoles produisent du dioxyde de carbone et des polluants lors des combustions. Il s'agit dans cette activité de sensibiliser les élèves aux quantités de CO_2 libéré et aux conséquences des produits polluants de ces combustions sur l'environnement et la santé.

L'activité est proposée par équipes en variante pédagogique pour les questions 1 et 2. Il est ainsi plus facile aux élèves qui n'ont pas pris la spécialité physique chimie d'effectuer les calculs de quantités de matière et de masses à partir d'une équation de réaction.

• **Corrigés du guide de travail**

1. a. Le doc 2 donne l'énergie dégagée lors de la combustion d'un kilogramme d'essence soit 44 MJ. Pour obtenir une énergie de 1 MJ, on doit avoir une masse d'essence $m_{\text{essence}} = \frac{1}{44}$

$$\text{soit } m_{\text{essence}} = 0,023 \text{ kg} = 23 \text{ g.}$$

Sachant qu'une mole d'essence a une masse de 114 g, alors $n_{\text{essence}} = \frac{23}{114}$ soit $n_{\text{essence}} = 0,20 \text{ mol}$.

b. L'équation de réaction (1) nous permet de dire que 2 moles d'essence produisent 16 moles de CO_2 ou plus simplement qu'une mole d'essence produit 8 moles de CO_2 , ce qui conduit à la relation : $n_{\text{CO}_2} = 8 n_{\text{essence}}$ donc $n_{\text{CO}_2} = 8 \times 0,20$ soit $n_{\text{CO}_2} = 1,6 \text{ mol}$.

c. Une mole de CO_2 ayant une masse de 44 g, alors $m_{\text{CO}_2} = 1,6 \times 44$ soit $m_{\text{CO}_2} = 70 \text{ g}$.

2. On fait les mêmes calculs qu'à la question 1 pour la biomasse. On trouve : $m_{\text{biomasse}} = \frac{1}{15}$ soit $m_{\text{biomasse}} = 0,067 \text{ kg} = 67 \text{ g}$.

Une mole de biomasse a une masse de 162 g donc $n_{\text{biomasse}} = \frac{67}{162}$, soit $n_{\text{biomasse}} = 0,41 \text{ mol}$.

2 moles de biomasse produisent 12 moles de CO_2 ou plus simplement une mole de biomasse produit 6 moles de CO_2 . On a la relation : $n_{\text{CO}_2} = 6 n_{\text{biomasse}}$ soit $n_{\text{CO}_2} = 2,5 \text{ mol}$ et $m_{\text{CO}_2} = 110 \text{ g}$.

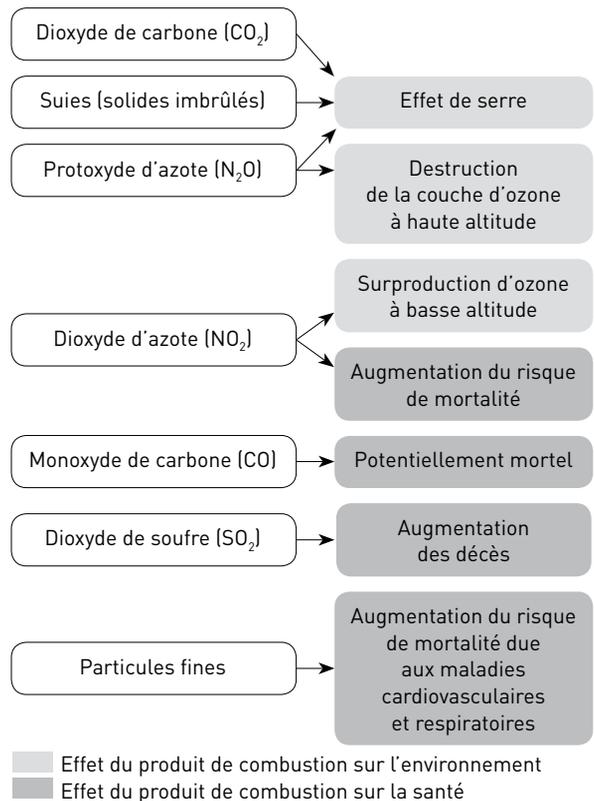
3. Le premier graphique du doc 4 montre que le taux de décès lors de l'épisode de smog durant l'hiver 1952 à Londres est lié à l'augmentation de la concentration en dioxyde de soufre. Le smog est un brouillard épais constitué de suies et de gouttelettes d'eau qui s'est formé en présence de dioxyde de soufre et de suies dans l'atmosphère.

La carte du doc 4 montre que la concentration en dioxyde d'azote augmente d'autant plus qu'on se rapproche de Paris, c'est-à-dire que la densité de la population et du trafic routier devient importante. Le dioxyde d'azote se forme à partir du monoxyde d'azote, lui-même libéré par la combustion des fiouls, utilisés dans le chauffage domestique. Les particules fines sont produites par les véhicules et plus particulièrement ceux à moteur Diesel. Le 2^e graphique du doc 4 montre que l'augmentation de la mortalité est de :

- 0,9 % lorsque la concentration en dioxyde d'azote augmente de $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
- 1,7 % lorsque la concentration en particules fines augmente de $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (causes cardio-vasculaires et respiratoires).

On peut donc corréliser l'augmentation des maladies cardiovasculaires et respiratoires aux polluants dus au chauffage par combustibles fossiles et aux carburants.

Synthèse



Activité 4. L'empreinte carbone des activités et des personnes

- **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

L'activité aborde l'empreinte carbone des activités et des personnes au travers des voitures de différentes énergies (électrique, hybride ou thermique), des matières premières et de diverses sources de protéines animales. Une partie de cette activité peut être donnée en classe inversée (voir parcours 2).

- **Corrigés du guide de travail**

1. D'après le doc 2, le domaine dont l'empreinte carbone est la plus élevée est le transport, pour laquelle la voiture est le principal contributeur. Les transports contribuent par an à l'émission de $2\,920 \text{ kg CO}_2\text{-eq/an}$ sur un total de $12\,093 \text{ kg CO}_2\text{-eq/an}$ pour un Français, pour un pourcentage de $\frac{2\,920 \times 100}{12\,093}$ soit 24 %.

2. En 2016, la fabrication des voitures électriques produit davantage de GES que la fabrication des

voitures hybrides et des voitures thermiques. Pour une utilisation de 150 000 km, les voitures électriques produisent moins de GES que les voitures hybrides et beaucoup moins que les voitures thermiques (doc 4). Les constatations devraient être les mêmes en 2030 mais pour chacune d'elles avec une réduction des émissions de GES par rapport à 2016.

3. La fabrication d'une voiture électrique émet plus de GES que la fabrication d'une voiture thermique. D'après les docs 3 et 4, ceci est dû à la composition et à la fabrication des batteries qui consomment plus d'énergie.

4. Le porc est la viande la plus consommée mais les bovins émettent plus de la moitié de la quantité de GES de tous les animaux à viande. Ceci est dû à des quantités d'eau et d'alimentation très importantes ; celles-ci sont en effet supérieures pour la production bovine par rapport aux autres productions. Les ressources végétales nécessaires demandent des surfaces plus grandes, pouvant aller jusqu'à la déforestation. Les types d'élevage et de culture (intensifs) sont également responsables de l'augmentation des émissions de GES.

Synthèse

Pour réduire l'empreinte carbone, on pourrait prendre les transports en commun, aller à pied sur des petits trajets, opter pour une voiture électrique ou hybride, manger moins de viande (notamment de bœuf), etc.

Activité 5. Les scénarios de transition écologique

• **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

L'objectif de cette activité est de montrer que les différents scénarios de l'évolution globale du climat dépendent des stratégies que l'humanité mettra en œuvre pour le contrôler. Elle s'inscrit donc dans l'objectif général de formation « Identifier et comprendre les effets de la science sur l'environnement ». En effet, la science permet de comprendre que les activités humaines sont responsables du réchauffement climatique global actuel. Grâce à l'intervention de différents acteurs des analyses climatiques (GIEC...), la science tente de le contrôler. Il s'agit donc de faire comprendre à chacun en quoi la culture scientifique est aujourd'hui indispensable pour saisir l'évolution

du climat et d'en contrôler les impacts (stratégies d'adaptation).

• **Corrigés du guide de travail**

1. En fonction des stratégies d'atténuation qui définissent les différents scénarios établis par le GIEC, la concentration en CO₂ sera identique à l'actuelle (400 ppm, scénario RCP2.6) et pourrait tripler dans le cas du scénario le plus pessimiste (1 200 ppm, scénario RCP8.5). En fonction de ces différents scénarios, les projections sur l'augmentation de la température globale vont d'une augmentation de 1 °C par rapport à la température actuelle (RCP2.6) à une augmentation de 4 °C (scénario RCP8.5). Les autres scénarios donnent des valeurs intermédiaires. Ceci montre l'importance des stratégies d'atténuation, à savoir réduire l'émission des GES.

2. Dans le doc 2, quel que soit le scénario proposé, une augmentation de température entraîne dans les zones tropicales une baisse du rendement de maïs, d'autant plus forte s'il n'y a pas de mesures d'adaptation. Cette baisse peut être mise en relation avec la diminution de la pluviométrie, l'augmentation des épisodes de sécheresse et la baisse de l'activité photosynthétique.

Cet aléa peut entraîner des risques de famine chez les populations les plus vulnérables, qui ont des capacités d'adaptation faibles (doc 3).

Par contre, en zone tempérée, le rendement diminue peu voire ne diminue pas, avec ou sans mesure d'adaptation.

Au Nicaragua, la diminution des ressources agricoles, liée à la perte de la canopée et la sécheresse, a comme risque une augmentation de la pauvreté et des contestations sociales (doc 4).

Un exemple d'aléa est la fonte des glaciers, qui est provoquée par l'augmentation de la température. Ceci entraîne une montée des eaux et un risque de migration de millions de personnes en Asie (doc 3), affectant plus les personnes les plus vulnérables.

3. Pour diminuer les risques découlant de la baisse de production et de qualité des grains de café, les autorités mettent en place des mesures d'adaptation :

- modification des pratiques des petits producteurs (cultiver des variétés plus résistantes à la chaleur et aux sécheresses, aménager des systèmes d'irrigation, etc.) ;
- diversification de leur production ;
- migration de leur zone de production en altitude.

Synthèse

Le GIEC propose des scénarios qui présentent les évolutions possibles des émissions de gaz à effet de serre. Ces scénarios sont établis en fonction de l'empreinte carbone des activités humaines, de l'évolution des comportements et des technologies. Une stratégie d'atténuation est associée à chaque scénario afin de limiter l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre responsable de l'augmentation des températures globales. Les aléas et les risques liés au réchauffement climatique et affectant les écosystèmes et les populations sont nombreux. Les scénarios aident les décideurs à prendre les mesures d'adaptation nécessaires.

Se tester

p. 80

1. **a, c et d**
2. **a. Vrai b. Faux c. Faux d. Faux**
3. **d**
4. **d**
5. **a. Faux b. Faux c. Faux**
6. **1. Limiter**
 2. Viande bovine
 3. Isoler – Diminuer
 4. Porter
7. **a. Aléa**
 - b. Risque
 - c. Adaptation
 - d. Atténuation

Travailler des compétences scientifiques

p. 81

9. Reasonner à partir de données

Pour la France, le MSR est nettement inférieur à 5 alors que pour l'Inde il est supérieur à 5. Ce pays est donc exposé à un risque multisectoriel face aux aléas qui seraient inhérents au changement climatique pour un scénario à 2 °C d'augmentation de température.

Le revenu journalier moyen en France est supérieur ou égal à 35 \$ alors qu'en Inde il est compris entre 2,8 et 10 \$. D'après l'énoncé, la population de l'Inde est donc vulnérable contrairement à celle de la France.

Le MSR prend en compte les risques liés à la production d'électricité, les variations de rendement des cultures et la dégradation de l'habitat. On peut donc conjecturer que l'énergie électrique, la nourriture et l'habitat coûteront plus chers. Une population aux faibles revenus est donc plus vulnérable.

Appliquer

p. 82

10. Unités d'énergie

1. $\frac{5,6 \times 10^4}{4,18 \times 10^{10}}$ soit $1,3 \times 10^{-6}$ tep.
2. $0,3215 \times 4,18 \times 10^{10}$ soit $1,3 \times 10^{10}$ J = $1,3 \times 10^4$ MJ.

11. Normes européennes pour les véhicules

Les normes européennes concernant chaque polluant sont de plus en plus sévères. Ceci s'explique par une prise de conscience des effets sanitaires de ces polluants sur les êtres humains. On remarque toutefois que la norme sur le monoxyde d'azote est plus drastique pour les moteurs diesel que pour les moteurs à essence (respectivement $500 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$ et $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$).

12. Comparaison des quantités de CO₂ émis par plusieurs sources d'énergie

1. Les énergies éolienne et solaire proviennent de sources d'énergie renouvelable.
2. L'équation de réaction modélisant une combustion complète fait apparaître la formation de dioxyde de carbone. Cela explique pourquoi ces sources libèrent beaucoup plus de dioxyde de carbone.

13. Montée du niveau de la mer aux Pays-Bas

1. Pour les Pays-Bas, les risques associés à l'élévation du niveau des océans en Europe sont moyens à court terme. À long terme, ils deviendraient élevés pour un scénario d'augmentation des températures à 2 °C et très élevés pour un scénario d'augmentation des températures à 4 °C.
2. Ces risques pourraient être réduits quel que soit le scénario en prenant des mesures d'adaptation comme par exemple construire des digues ou renforcer celles qui existent déjà pour contenir les eaux.

S'entraîner

p. 83

14. Énergies renouvelables au Portugal

1. Une énergie primaire est une source d'énergie non transformée, disponible sous forme de flux ou de stock.

2. L'énergie donnée a pour valeur : $\frac{2,5 \times 10^{17}}{4,18 \times 10^{10}}$ soit $6,0 \times 10^6$ tep ou 6,0 Mtep.

3. Le Portugal a dû importer ce qui n'a pas pu être produit, c'est-à-dire 22 – 6,0 soit 16 Mtep.

4. Le pourcentage de l'énergie primaire produite en 2016 est $\frac{6}{22} \times 100$ soit 27 %.

Le pourcentage de l'énergie importée en 2016 est $\frac{16}{22} \times 100$ soit 73 %.

15. Quel combustible ?

1. a. L'énergie massique du méthane est $E_m = 56 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. La masse m de méthane qui permet d'obtenir une énergie $E = 1,0 \text{ kJ}$ est : $m = \frac{E}{E_m}$ donc $m = \frac{1,0}{56}$ soit $m = 0,018 \text{ g}$.

b. Sachant qu'une mole de méthane a une masse de 16 g, la quantité de matière n correspondant à la masse m est :

$$n = \frac{0,018}{16} \text{ soit } n = 1,1 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

c. D'après l'équation de réaction, une mole de méthane produit une mole de CO_2 donc $n = n_{\text{CO}_2}$ soit $n_{\text{CO}_2} = 1,1 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

d. $m_{\text{CO}_2} = 1,1 \times 10^{-3} \times 44$ soit $m_{\text{CO}_2} = 0,048 \text{ g}$.

2. a. L'énergie massique du cétane est $E_m = 42 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$. La masse m de cétane qui permet d'obtenir une énergie $E = 1,0 \text{ kJ}$ est : $m = \frac{E}{E_m}$ donc $m = \frac{1,0}{42}$ soit $m = 0,024 \text{ g}$.

b. Sachant qu'une mole de cétane a une masse de 226 g, la quantité de matière n correspondant à la masse m est :

$$n = \frac{0,024}{226} \text{ soit } n = 1,1 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

c. D'après l'équation de réaction, deux moles de cétane produisent 32 moles de CO_2 ou plus simplement une mole de cétane produit 16 moles de CO_2 alors $n_{\text{CO}_2} = 16 n$ donc $n_{\text{CO}_2} = 16 \times 1,1 \times 10^{-4}$ soit $n_{\text{CO}_2} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$.

d. $m_{\text{CO}_2} = 1,8 \times 10^{-3} \times 44$ soit $m_{\text{CO}_2} = 0,079 \text{ g}$.

3. Pour une même valeur d'énergie, la chaudière au fioul produit plus de dioxyde de carbone que celle au gaz naturel. La famille devrait acheter une chaudière au gaz naturel.

16. Un réchauffement plus important que prévu ?

Seul le scénario correspondant à l'objectif de la neutralité carbone à l'horizon 2100 permet de limiter puis de stopper l'augmentation de la température.

Les trois autres scénarios envisagent pour 2100 :

- une augmentation de la température de 3 °C par rapport en 2020 avec des progrès lents en matière environnementale ;
- une augmentation de la température de 4 °C avec une poursuite de la trajectoire actuelle et du productivisme ou de 6 °C avec une croissance économique rapide alimentée par l'utilisation massive des énergies fossiles.

Vers le bac

p. 84-85

17. Comparaison des mix énergétiques de la France et de l'Allemagne

1. Les productions d'électricité des deux pays sont équivalentes, la différence n'étant pas significative (de l'ordre de 1 %).

2. L'Allemagne a engagé une politique de transition énergétique vers les énergies renouvelables pour sortir du nucléaire. Pour assurer sa transition, l'Allemagne a cependant recours aux énergies fossiles telles que le charbon.

3. D'après le doc 1, le pourcentage des énergies renouvelables en Allemagne est de 40,3 % (20,4 + 8,4 + 8,3 + 3,2), ce qui est bien en accord avec sa politique énergétique.

4. a. La France produit son électricité à partir de 71,7 % de nucléaire, contre 13,3 % pour l'Allemagne soit 5 fois plus.

b. La France produit son électricité à partir de 7,2 % de combustibles fossiles, contre 45,4 % pour l'Allemagne soit 6 fois moins.

c. La France produit son électricité à partir de 21,3 % d'énergies renouvelables, contre 40,3 % pour l'Allemagne soit 2 fois moins.

5. L'Allemagne produit presque la moitié de son électricité à partir des combustibles fossiles qui émettent énormément de dioxyde de carbone.

La France produit plus des 2/3 de son électricité à partir de l'énergie nucléaire, qui n'émet que peu de CO₂ sur son cycle de vie.

On peut le vérifier à partir des données : un kWh produit en France émet 89 g de CO₂ alors qu'un kWh produit en Allemagne émet 420 g de CO₂, soit entre 4 à 5 fois moins.

6. Pour le mix énergétique français :

- Points positifs : 1/5 de l'électricité produite à partir de ressources d'énergies renouvelables (éolien, hydraulique, solaire), un pourcentage faible d'électricité produite à partir d'énergies fossiles, peu d'émissions de CO₂ avec le nucléaire qui représente plus de 70 % de la production d'électricité.
- Points négatifs : très grande part de l'électricité produite à partir de l'énergie nucléaire dont les ressources sont épuisables, avec un risque d'accidents et les déchets à traiter.

Pour le mix énergétique allemand :

- Points positifs : une part très importante de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables (éolien, solaire, biomasse), un pourcentage faible de l'électricité produite à partir du nucléaire donc moins de déchets à traiter.
- Points négatifs : l'Allemagne est le plus gros pollueur de l'Europe en produisant son électricité à partir de sources non renouvelables et polluantes (houille, lignite, gaz, etc.).

18. Empreinte carbone de véhicules

1. On peut comparer les deux véhicules car leurs puissances sont équivalentes.

2. Pour parcourir 200 km, le véhicule Diesel consomme le volume :

$$V_{\text{diesel}} = 2 \times 3,2 \text{ soit } V_{\text{diesel}} = 6,4 \text{ L.}$$

Pour parcourir 200 km, le véhicule à essence consomme le volume :

$$V_{\text{essence}} = 2 \times 4,2 \text{ soit } V_{\text{essence}} = 8,4 \text{ L.}$$

3. a. On utilise l'énergie produite par la combustion d'un litre de carburant que l'on multiplie par le volume de carburant calculé. On obtient :

$$E_{\text{diesel}} = 40,3 \times 6,4 \text{ soit } E_{\text{diesel}} = 260 \text{ MJ.}$$

$$E_{\text{essence}} = 33,4 \times 8,4 \text{ soit } E_{\text{essence}} = 280 \text{ MJ.}$$

b. On doit multiplier la masse de CO₂ émis par unité d'énergie libérée lors de la combustion d'un carburant par la valeur de l'énergie calculée, celle-ci étant exprimée en GJ. On obtient :

$$m_{\text{diesel}} = 0,260 \times 73 \text{ soit } m_{\text{diesel}} = 19 \text{ kg de CO}_2 \text{ émis.}$$

$$m_{\text{essence}} = 0,280 \times 75 \text{ soit } m_{\text{essence}} = 21 \text{ kg de CO}_2 \text{ émis.}$$

4. Dans le doc 1, les émissions de CO₂ sont données pour un km. Pour un parcours de 200 km, on devrait avoir :

$$m_{\text{diesel-théorique}} = 0,085 \times 200 \text{ soit } m_{\text{diesel-théorique}} = 17 \text{ kg.}$$

$$m_{\text{essence-théorique}} = 0,096 \times 200 \text{ soit } 19 \text{ kg.}$$

On trouve des valeurs sensiblement identiques à celles calculées dans la question précédente et notamment que pour un parcours équivalent, le véhicule diesel rejette un peu moins de CO₂ que le véhicule à essence.

5. Les véhicules Diesel sont décriés car ils produisent beaucoup de particules fines polluantes et responsables de pathologies.

19. Un impact variable du CO₂ sur le développement des végétaux

En comparant les valeurs de la photosynthèse pour la teneur actuelle en CO₂ et une teneur de 500 ppm, on observe qu'une augmentation du taux de CO₂ provoque une augmentation de presque 50 % de la photosynthèse chez les plantes en zone tempérée mais n'a presque aucun effet sur les plantes cultivées en zone tropicale. Le CO₂ a un effet favorable sur le rendement des cultures en zone tempérée.

Une augmentation du taux de CO₂ provoque par contre une diminution des teneurs en zinc, fer et protéines chez le riz.

Si l'augmentation de CO₂ favorise le rendement pour le riz (photosynthèse identique à celle des plantes en zone tempérée), elle diminue la qualité de la production. De plus, l'augmentation de CO₂ n'a pas le même effet sur les différentes espèces cultivées.

Prévoir les effets de l'augmentation du CO₂ est donc complexe.

CHAPITRE 5 Deux siècles d'énergie électrique

I. Introduction

Programme

Depuis le XIX^e siècle, les progrès de la recherche scientifique fondamentale et de l'invention technique ont conduit à développer des générateurs électriques pratiques, performants, à l'impact climatique et environnemental de moins en moins marqué.

Historiquement, le développement des techniques d'obtention d'énergie électrique s'est appuyé sur des découvertes expérimentales et des avancées théoriques qui furent souvent le résultat de recherches dont ce développement n'était pas le but premier. Il est ainsi fréquent que les résultats de la recherche fondamentale aboutissent à des innovations technologiques non anticipées.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIX^e siècle. Ils réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un rendement potentiellement très proche de 1.</p> <p>Au début du XX^e siècle, la physique a connu une révolution conceptuelle à travers la vision quantique qui introduit un comportement probabiliste de la nature. Le caractère discret des spectres de raies d'émission des atomes s'explique de cette façon.</p> <p>L'exploitation technologique des matériaux semi-conducteurs, en particulier du silicium, en est également une conséquence.</p> <p>Ces matériaux sont utilisés en électronique et sont constitutifs des capteurs photovoltaïques. Ceux-ci absorbent l'énergie radiative et la convertissent en énergie électrique.</p>	<p>Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur mobile) dans un schéma fourni.</p> <p>Analyser les propriétés d'un alternateur modèle étudié expérimentalement en classe.</p> <p>Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer.</p> <p>Interpréter et exploiter un spectre d'émission atomique.</p> <p>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.</p> <p>Tracer la caractéristique $i(u)$ d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Les spectres de raies d'émission atomiques ainsi que les notions de caractéristique $i(u)$ et de point de fonctionnement d'un dipôle électrique, déjà connues, sont utilisées. La loi de Faraday est hors programme.</p>	

Commentaires pédagogiques

Le chapitre 5 est le premier des quatre chapitres du thème 2 intitulé « Le futur des énergies ». Depuis l'ère industrielle, les activités humaines et la demande croissante en énergie ont eu pour conséquences l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La principale cause du réchauffement climatique étant les énergies fossiles, le thème 2 vise à concevoir une production d'énergies moins émettrices de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre. L'énergie électrique jouant un rôle majeur dans l'économie mondiale, le chapitre 5 est axé sur les alternateurs électriques et les capteurs photovoltaïques ainsi que sur l'historique de leurs réalisations, après l'aboutissement de nombreux et longs échanges entre la science fondamentale, la technologie et l'industrie.

Ce chapitre met donc en exergue deux des trois objectifs généraux de l'Enseignement scientifique. « Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration » est l'objectif des activités 1 et 4, où il est montré que le savoir scientifique se construit peu à peu avec des expériences, des découvertes fortuites et des avancées théoriques et technologiques. L'activité 1 montre que deux siècles ont été nécessaires pour obtenir de l'énergie électrique à partir d'un alternateur dont le fonctionnement est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique. L'activité 4 permet d'interpréter les spectres d'émission atomique, vus en classe de seconde, à partir du postulat d'Einstein sur la théorie des quanta. Des niveaux d'énergie dans l'atome, on passe aux bandes d'énergie dans les matériaux qu'ils soient conducteurs, isolants ou semi-conducteurs.

Avec « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques », les découvertes et théories vues précédemment sont mises en application par des travaux pratiques pour :

- l'alternateur, déjà vu au cycle 4, mais pour lequel on analyse désormais ses propriétés (activité 2) et on aborde la notion de rendement (activité 3), notion nouvelle pour les élèves qui sera développée dans le chapitre 6 ;
- la cellule photovoltaïque et ses conditions optimales d'utilisation (activité 6).

Les conversions d'énergie et la caractéristique $I = f(U)$ sont connues des élèves car elles ont été traitées en cycle 4.

Dans l'activité 5, les élèves découvrent le fonctionnement très simplifié d'une cellule photovoltaïque, une des applications des semi-conducteurs.

Les alternateurs et les capteurs photovoltaïques seront repris dans les différents types de centrales abordées dans le chapitre 6.

Objectifs

- Savoir que le principe de l'alternateur est fondé sur le phénomène d'induction électromagnétique et comprendre son fonctionnement.
- Comprendre la conversion d'énergie réalisée par un alternateur.
- Identifier et exploiter les spectres de raies d'émission des atomes et les bandes d'énergie des semi-conducteurs.
- Comprendre les applications des semi-conducteurs dans les capteurs photovoltaïques.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- M.-C. de La Souchère, *Histoire de l'électricité : lumières d'hier et d'aujourd'hui*, Ellipse (2011).
- D. Bodanis, *La surprenante histoire de la fée électricité*, Dunod (2006).

► Sites Internet

- Article sur la démarche de Faraday :
<http://www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/faraday/induction/index.php>
- Le mémoire de Faraday sur ses expériences d'induction (consultable sur Gallica, en anglais) :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94883h/f10.image.r=.langFR>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ

p. 88

1. **b** et **c**
2. **a** et **b**
3. **b**
4. **a** et **c**

Activités

p. 90-97

Activité 1. De l'induction électromagnétique à l'alternateur

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration, Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

Dans cette activité, nous avons souhaité montrer la naissance de la théorie de l'électromagnétisme

et ses applications pratiques (électroaimants et télégraphie à partir de l'apparition de la pile de Volta et de l'observation d'Ørsted) puis comment le questionnement théorique de Faraday a conduit à l'invention des alternateurs. Cette activité est ainsi l'occasion de montrer le lien entre questionnement théorique et réalisations concrètes souligné par le programme.

Les élèves peuvent réaliser le TP proposé en parcours 2 en une heure, si les lycées sont équipés en oscilloscopes numériques, ceux-ci ayant été réglés au préalable. L'avantage de l'oscilloscope numérique est qu'il permet de conserver la trace à des vitesses de balayage faibles, la visualisation étant difficile à faire pour un élève avec un oscilloscope classique. De bons résultats ont été obtenus avec une bobine d'inductance 27 mH, un aimant droit pour une vitesse de balayage de 200 ms/div et une sensibilité verticale de 50 mV/div. L'expérience réalisée au laboratoire peut être montrée aux élèves par vidéo.

• Corrigés du guide de travail

1. Un électroaimant est constitué par une bobine parcourue par un courant électrique. Pour alimenter l'électroaimant, il a d'abord fallu disposer de générateurs électriques produisant un courant électrique continu, comme les piles.

2. Le phénomène d'induction électromagnétique apparaît lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur placé dans un champ magnétique variable.

Dans l'expérience de Faraday, la bobine ③ constitue le conducteur électrique, le champ magnétique est créé par la bobine ① alimentée par la pile ②.

3. Le champ magnétique créé par la bobine ① est variable à la fermeture du circuit (il augmente, partant d'un champ nul) et à son ouverture (il diminue, pour redevenir nul). Or le phénomène d'induction électromagnétique ne se produit que lorsque le champ magnétique varie ; c'est la raison pour laquelle Faraday n'observait pas de courant induit quand le circuit était fermé, le champ créé par la bobine ① étant alors constant.

4. Dans l'expérience du laboratoire, le courant alternatif est produit en approchant puis en éloignant l'aimant de la bobine, donc en faisant augmenter puis diminuer le champ magnétique. On observe à l'oscilloscope une tension négative puis positive dans le cas du pôle nord.

Dans l'alternateur schématisé, le champ magnétique est créé par un aimant, qu'on fait tourner afin de faire varier le champ magnétique dans l'espace où se trouve la bobine. Il apparaît donc un courant induit dans la bobine. Lors de la rotation de l'aimant, on aura périodiquement le pôle nord qui s'approche de la bobine, tandis que le pôle sud s'éloigne, suivi du mouvement inverse. Cela permet d'obtenir un courant alternatif.

Synthèse

Dans un alternateur, le mouvement périodique de l'aimant par rapport à la bobine permet, grâce au phénomène d'induction électromagnétique, d'obtenir une tension périodique alternative.

L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique.

Activité 2. L'alternateur électrique

• **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

L'activité consiste à étudier l'alternateur de démonstration pour mettre en évidence l'allure de la tension aux bornes de la bobine ainsi que l'influence de la vitesse de rotation sur différentes grandeurs représentant cette tension : U_{\max} , T et f .

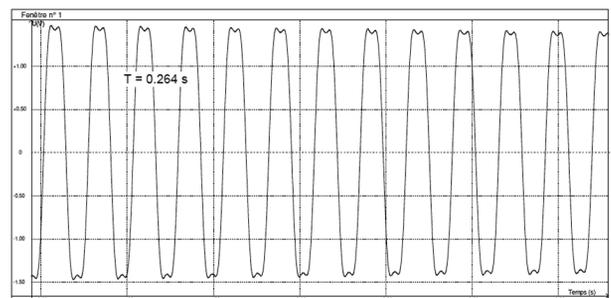
• **Corrigés du guide de travail**

1. La partie 1 est constituée par l'aimant et la partie 2 est constituée par la bobine. L'aimant en rotation constitue le rotor et la bobine étant fixe constitue le stator.

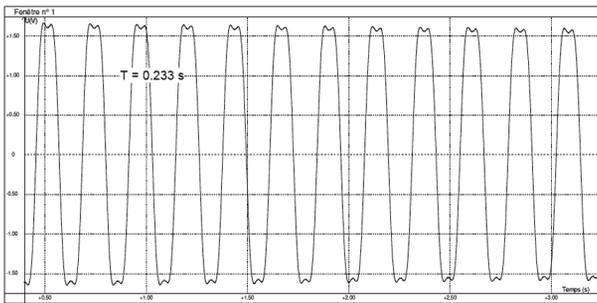
2. Lors de la mise en rotation de l'aimant, on observe que la DEL clignote.

D'après les trois acquisitions ci-après, l'allure de la tension est alternative et quasiment sinusoïdale.

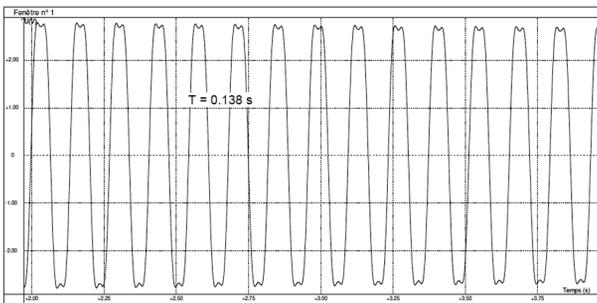
3. Voici les courbes obtenues pour des acquisitions avec des vitesses différentes.



Vitesse de rotation lente



Vitesse de rotation normale



Vitesse de rotation rapide

Les valeurs de U_{\max} , T et f pour les tensions obtenues aux bornes de la bobine sont données ci-dessous :

$$U_{\max} \approx 1,5 \text{ V} ; T = 0,264 \text{ s} \text{ soit } f = 3,79 \text{ Hz.}$$

$$U_{\max} \approx 1,6 \text{ V} ; T = 0,233 \text{ s} \text{ soit } f = 4,29 \text{ Hz.}$$

$$U_{\max} \approx 2,8 \text{ V} ; T = 0,138 \text{ s} \text{ soit } f = 7,25 \text{ Hz.}$$

On remarque que, lorsque la vitesse de rotation augmente, la valeur de U_{\max} augmente, la valeur de la période T diminue, donc celle de la fréquence f augmente.

Synthèse

La tension délivrée par le réseau n'a pas de valeur constante car les alternateurs électriques, comme l'alternateur de démonstration étudié ici, délivrent une tension alternative et sinusoïdale.

Activité 3. Le rendement d'un alternateur électrique

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

L'activité a pour objectif de déterminer le rendement de différents alternateurs afin de citer un (ou des) paramètre(s) susceptible(s) d'influencer sa valeur.

Cette activité étant simple, elle peut être donnée en classe inversée ou en tâche complexe (voir parcours 2).

• Corrigés du guide de travail

1. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant.

Alternateur	Puissance P	Rendement η
Leroy-Somer LSA-40	15 kW	0,905
Groupe électrogène	3,7 kW	0,88
Alternateur de réacteur	1 750 MW	0,982 à 0,993

2. La valeur η du rendement augmente avec la puissance électrique P et avec la taille de l'alternateur.

Synthèse

Les alternateurs ont un rendement très proche de 1, ce sont donc des convertisseurs très efficaces.

Activité 4. Les matériaux semi-conducteurs

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration
- **Commentaires sur l'activité**

Les notions de spectres de raies d'émission d'un atome et de bandes d'énergie d'un solide étant difficiles, il nous semble plus bénéfique pour les élèves de les faire travailler par équipes (voir parcours 2). Ils pourront ensuite mettre leurs résultats en commun et en discuter.

• Corrigés du guide de travail

1. Albert Einstein a repris l'hypothèse des quanta, à l'origine de la mécanique quantique formulée par Max Planck. Il postula pour cela l'existence des photons, particules qui transportent une quantité déterminée d'énergie lumineuse.

2. D'après le diagramme proposé, un photon d'énergie 1,20 eV ne peut pas être absorbé par l'atome d'hydrogène, il n'y a aucune transition entre deux niveaux qui correspond exactement à cette énergie. Par contre, un photon d'énergie $E = 0,97 \text{ eV}$ permet le passage du niveau $n = 3$ au niveau d'énergie $n = 5$ ($E = -0,54 - (-1,51)$ soit $E = 0,97 \text{ eV}$). Ce photon sera donc absorbé.

3. Le photon d'énergie $E = 0,97 \text{ eV}$ ne peut pas être absorbé dans le cas du silicium, car la valeur de son énergie est inférieure au gap à franchir. Le photon d'énergie $E = 1,20 \text{ eV}$ pourra être absorbé, 1,20 eV étant supérieur à 1,12 eV.

4. On voit à l'aide du doc 4 qu'un photon d'énergie $E = 1,12 \text{ eV}$, correspondant au gap du silicium, a une longueur d'onde de l'ordre de 1100 nm . On voit plus précisément que tous les photons entre 300 nm et 1100 nm peuvent être absorbés : ils ont tous une énergie supérieure à celle du gap du silicium.

Synthèse

Les photons absorbés par un semi-conducteur permettent de fournir de l'énergie à des électrons qui deviennent conducteurs du courant électrique, en passant dans la bande de conduction. De l'énergie lumineuse (portée par les photons) sera ainsi transformée en énergie électrique (mouvement de particules chargées, ici des électrons).

Activité 5. Des semi-conducteurs aux cellules photovoltaïques

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité est complémentaire de la précédente. Elle reprend la notion de liaison de valence entre deux atomes abordée en 2^{de} et permet ainsi aux élèves de comprendre ce que sont les dopages N et P. Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque est vu de façon très succincte.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Une liaison de valence est la mise en commun de deux électrons entre deux atomes, chaque atome apportant un électron. Des atomes autres que des atomes d'hydrogène qui forment des liaisons de valence ont huit électrons sur leur couche externe.

L'atome de silicium possède 4 électrons de valence, il peut donc former 4 liaisons de valence avec un autre atome de silicium.

Un atome de phosphore possède 5 électrons de valence, mais l'atome de silicium n'en possède que 4 ; un atome de phosphore et un atome de silicium ne pourront former que 4 liaisons de valence.

Un atome de bore possède 3 électrons de valence et l'atome de silicium en possède 4 ; un atome de silicium et un atome de bore ne pourront former que 3 liaisons de valence.

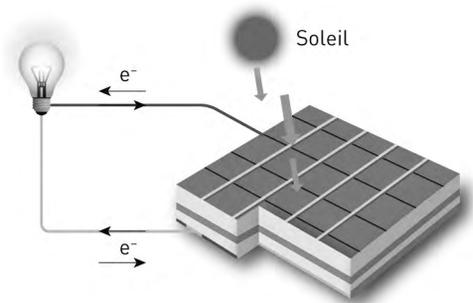
2. Un des 5 électrons de valence de l'atome de phosphore ne peut être mis en commun avec les

électrons de valence de l'atome de silicium. Le matériau ainsi formé est dopé N car il possède un excédent d'électrons (charge globale négative).

Il va manquer un électron de valence à l'atome de bore pour former 4 liaisons entre les atomes de bore et de silicium. Le matériau ainsi formé est dopé P car il possède un défaut d'électrons (charge globale positive).

3. Le contact supérieur est chargé négativement, le contact inférieur est chargé positivement. Les contacts supérieur et inférieur sont dans des états électriques différents : il existe donc une tension entre les contacts supérieur et inférieur.

4.



Le sens du courant est indiqué sur les fils de connexion, le sens de déplacement des électrons est indiqué en dehors du circuit.

Synthèse

Quand un photon d'énergie suffisante arrache un électron d'un atome de silicium, il crée un trou ; l'électron (-) et le trou (+) se déplacent en sens contraires. Les électrons s'accumulent dans la zone dopée N et les trous s'accumulent dans la zone dopée P. Le déplacement des charges électriques est à l'origine d'un courant continu dans le circuit extérieur.

Activité 6. La cellule photovoltaïque

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

Les mesures ont été réalisées avec une lampe à incandescence de puissance 25 W dans l'obscurité pour que la lampe soit l'unique source de lumière.

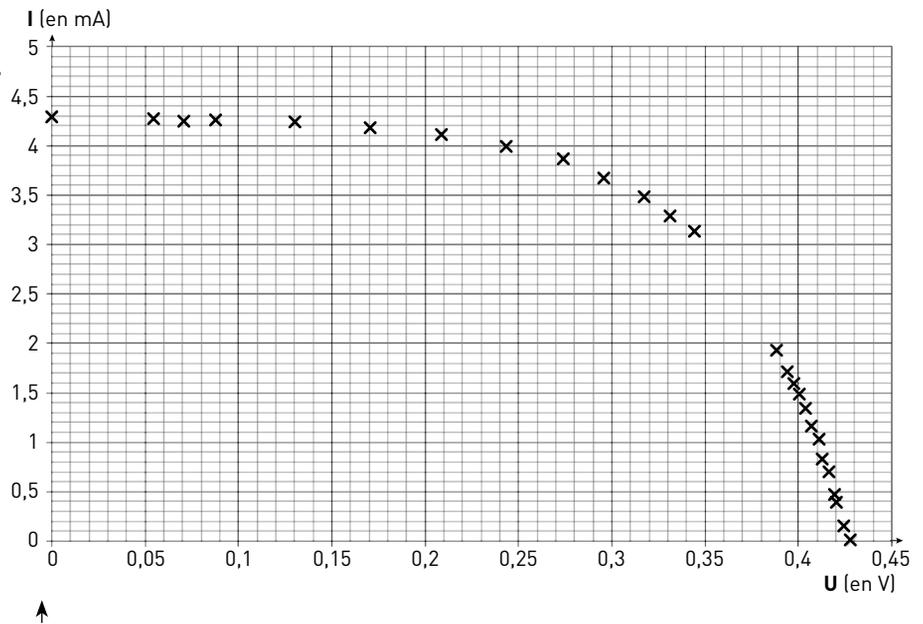
Les mesures peuvent être réalisées avec une lampe à LED.

• Corrigés du guide de travail

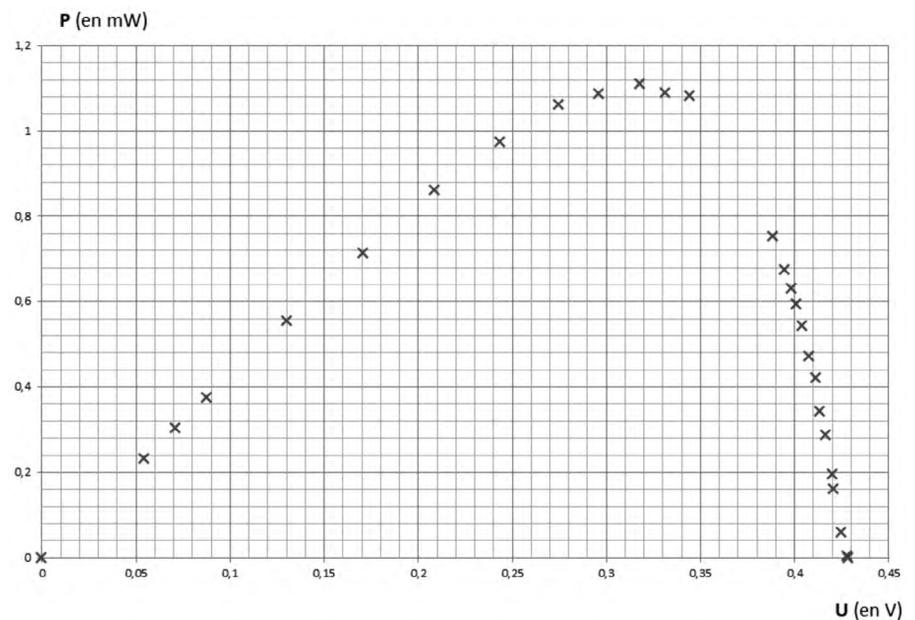
R en Ω	U en V	I en mA	P en mW	R en Ω	U en V	I en mA	P en mW	R en Ω	U en V	I en mA	P en mW
5,00E+06	0,4285	0	0	2,00E+02	0,4042	1,344	0,543	6,00E+01	0,2745	3,87	1,062
5,00E+04	0,4279	0,0083	0,0036	1,70E+02	0,4009	1,482	0,594	5,00E+01	0,2435	4	0,974
2,00E+03	0,4251	0,1414	0,060	1,50E+02	0,3983	1,585	0,631	4,00E+01	0,2089	4,12	0,861
1,00E+03	0,4208	0,383	0,161	1,30E+02	0,3945	1,712	0,675	3,00E+01	0,1706	4,18	0,713
8,00E+02	0,4201	0,467	0,196	1,00E+02	0,3887	1,936	0,753	2,00E+01	0,1303	4,25	0,554
5,00E+02	0,4164	0,692	0,288	9,90E+01	0,3445	3,14	1,082	1,00E+01	0,0878	4,27	0,375
4,00E+02	0,4136	0,826	0,342	9,00E+01	0,3313	3,29	1,090	6,00E+00	0,0711	4,26	0,303
3,00E+02	0,4115	1,025	0,422	8,00E+01	0,3178	3,49	1,109	2,00E+00	0,0543	4,28	0,232
2,50E+02	0,4075	1,158	0,472	7,00E+01	0,2962	3,67	1,087	0,00E+00	0	4,3	0,000

Mesures, calculs de la puissance électrique et tracés des caractéristiques.

Caractéristique (U, I)
de la cellule photovoltaïque
(lampe à incandescence 25 W).



Caractéristique (U, P)
de la cellule photovoltaïque
(lampe à incandescence 25 W).



1. La caractéristique $I = f(U)$ ne passe pas par l'origine du repère de coordonnées (0 ; 0) donc la cellule photovoltaïque est un générateur électrique.

2. Par lecture graphique, on a $P_{\max} = 1,12 \text{ mW}$.

3. Pour $P = P_{\max}$, on lit $U = 0,32 \text{ V}$ sur la caractéristique $P = f(U)$.

Pour $U = 0,32 \text{ V}$, on lit $I = 3,5 \text{ mA}$ sur la caractéristique $I = f(U)$.

La résistance optimale est obtenue avec la loi d'Ohm pour un conducteur ohmique :

$$R = \frac{U}{I} \text{ donc } R = \frac{0,32}{3,5 \times 10^{-3}} \text{ soit } R = 91 \Omega.$$

Synthèse

La cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative qu'elle reçoit du Soleil en énergie électrique et en énergie thermique. La valeur de la résistance doit être judicieusement choisie afin que la cellule photovoltaïque délivre la plus grande puissance possible.

Se tester p. 100

1. a et c
2. a. Vrai b. Faux c. Vrai d. Faux
3. a. Spectres de raies d'absorption
b. Spectres de raies d'émission
c. Spectres de raies d'absorption
d. Spectres de raies d'émission
4. a. Vrai b. Faux c. Faux d. Vrai
5. a. Faux b. Vrai c. Faux d. Vrai

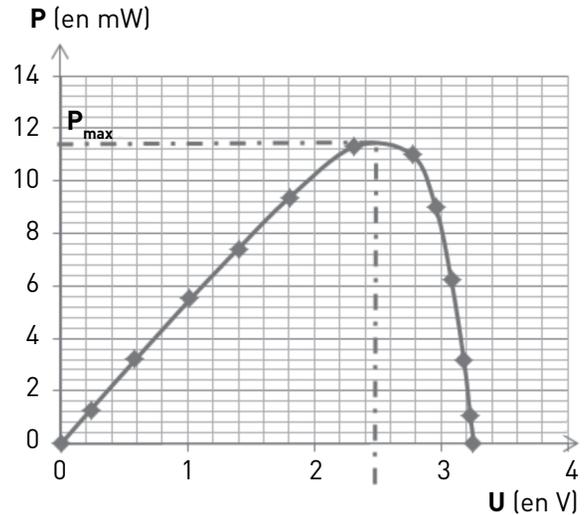
Travailler des compétences scientifiques p. 101

7. Utiliser un tableau pour tracer et exploiter des caractéristiques

1. a.

U (en V)	I (en mA)	P (en mW)
0	5,54	0
0,23	5,51	1,27
0,59	5,46	3,22
1,02	5,39	5,50
1,40	5,31	7,43
1,80	5,20	9,36
2,32	4,88	11,30
2,77	3,98	11,00

2,96	3,02	8,94
3,08	2,02	6,22
3,18	0,99	3,15
3,23	0,33	1,06
3,26	0	0,0

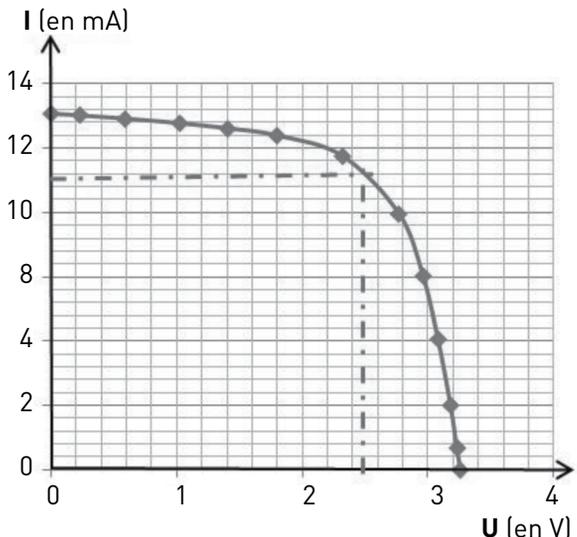


Caractéristique $P = f(U)$.

b. Par lecture graphique, on a : $P_{\max} = 11,4 \text{ mW}$.

2. Pour $P = P_{\max}$, on lit $U = 2,5 \text{ V}$.

3. a.



Caractéristique $I = f(U)$.

Par lecture graphique, on a $I = 4,6 \text{ mA}$.

b. On applique la loi d'Ohm pour un conducteur ohmique.

$$R = \frac{U}{I} \text{ donc } R = \frac{2,5}{4,6 \times 10^{-3}} \text{ soit } R = 5,4 \times 10^2 \Omega.$$

Appliquer

p. 102

8. L'expérience de Faraday

Les champs magnétiques créés par chaque enroulement se superposent. Ainsi, en utilisant plusieurs enroulements de fils, on pourra obtenir un champ magnétique plus important. Faraday espérait ainsi mettre plus facilement en évidence la création d'un courant électrique par un champ magnétique.

9. L'alternateur

1. La partie ① représente le stator, la partie ② représente le rotor.
2. La courbe b représente la tension délivrée par l'alternateur car elle est alternative et sinusoïdale. La courbe a représente une tension continue et la courbe c représente une tension sinusoïdale mais non alternative.
3. Un alternateur convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique et en énergie thermique.

10. Les niveaux d'énergie du mercure

1. Le spectre est un spectre d'émission car on analyse la lumière émise par la lampe et le spectre obtenu est constitué de raies colorées.
2. À chaque niveau d'énergie est associée une valeur d'énergie. Par exemple, pour le niveau $n = 3$, la valeur de l'énergie de l'atome de mercure est égale à $-3,7$ eV et pour le niveau d'énergie $n = 4$, la valeur de l'énergie de l'atome de mercure est égale à $-0,9$ eV. Entre ces deux niveaux, il y a de nombreuses valeurs d'énergie que l'atome ne peut pas prendre. L'atome de mercure ne peut donc pas prendre une infinité de valeurs d'énergie.

11. Les bandes d'énergie

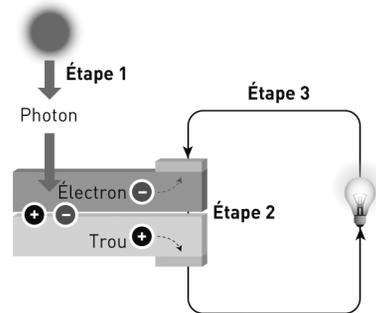
Le schéma a représente un matériau isolant, la bande interdite étant la plus importante de celles représentées.

Le schéma b représente un matériau semi-conducteur, la bande interdite étant la plus petite de celles représentées.

Le schéma c représente un matériau conducteur, car il n'y a pas de bande interdite ; les bandes de valence et de conduction se chevauchent.

12. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1. Une cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative reçue du Soleil en énergie électrique et en énergie thermique.
- 2.



3. Étape 1 : un photon d'énergie suffisante arrache un électron d'un atome de la jonction et crée un trou.
- Étape 2 : les électrons et les trous se déplacent en sens contraires. Les électrons s'accumulent dans la zone dopée N et les trous s'accumulent dans la zone dopée P.
- Étape 3 : le circuit extérieur est parcouru par un courant électrique, du fait du déplacement des charges électriques.
4. Les électrons se déplacent de la zone - vers la zone + dans le circuit extérieur, le sens conventionnel du courant est opposé à celui des électrons.

S'entraîner

p. 103-104

13. L'électroaimant

Un électroaimant permet d'attirer les déchets contenant du fer au sein de déchets. Pour les séparer de l'électroaimant, il suffit de cesser d'alimenter celui-ci.

Un électroaimant est intéressant, car il permet d'obtenir des champs magnétiques bien plus importants que les aimants naturels : voir activité 1.

14. Le phénomène d'induction électromagnétique

1. L'ampèremètre indique 0 mA.
2. Pendant un court laps de temps, $I \neq 0$: il y a apparition d'un courant induit dans la bobine.

3. On peut déplacer l'aimant par rapport à la bobine, ou déplacer la bobine par rapport à l'aimant.

15. Le rendement d'un alternateur

1. $P = U \times I$ donc $P = 24,0 \times 10^3 \times 37,5 \times 10^3$ soit $P = 900$ MW.

2. $\eta = \frac{900}{900 + 9,00} = 0,99$ soit 99 %.

3. Cette valeur est habituelle car les alternateurs de forte puissance ont un rendement proche de 1.

16. Le rendement d'un alternateur de centrale hydroélectrique

1. L'alternateur convertit l'énergie cinétique (donc mécanique) de l'eau, accumulée lors de sa chute, en énergie électrique et en énergie thermique.

2. On lit sur le graphique le rendement pour ce débit de la turbine : $\eta_t = 91 \% = 0,91$.

On a d'après le texte $\eta = \eta_a \times \eta_t$, donc $\eta_a = \frac{\eta}{\eta_t}$
soit $\eta_a = \frac{0,86}{0,91} = 0,95 = 95 \%$.

Le rendement de l'alternateur est alors de 95 %.

17. Les niveaux d'énergie

L'atome peut passer du niveau d'énergie $n = 3$ au niveau d'énergie $n = 4$ en absorbant l'énergie :

$$E = -1,51 - (-1,93) \text{ soit } E = 0,42 \text{ eV.}$$

L'atome peut passer du niveau d'énergie $n = 3$ au niveau d'énergie $n = 5$ en absorbant l'énergie :

$$E = -1,38 - (-1,93) \text{ soit } E = 0,55 \text{ eV.}$$

L'atome peut passer du niveau d'énergie $n = 3$ au niveau d'énergie $n = 6$ en absorbant l'énergie :

$$E = -0,86 - (-1,93) \text{ soit } E = 1,07 \text{ eV.}$$

L'atome peut passer du niveau d'énergie $n = 3$ au niveau d'énergie $n = \infty$ en absorbant l'énergie :

$$E = 0 - (-1,93) \text{ soit } E = 1,93 \text{ eV.}$$

18. Un matériau semi-conducteur

1. $E_g = 1$ eV. Pour passer de la bande de valence à la bande de conduction, un électron doit franchir la bande interdite, donc absorber de l'énergie.

2. Un photon permettra à l'électron de franchir la bande interdite. Pour cela l'énergie E du photon devra être égale ou supérieure à E_g .

3. Dans la cellule, l'énergie radiative reçue du Soleil est convertie en énergie électrique et en énergie thermique.

19. L'alimentation du chargeur d'un portable

1. $S = 0,15 \times 0,07$ soit $S = 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2$.

2. Le rendement η est le quotient de la puissance électrique P_e et de la puissance reçue P_r , c'est-à-dire : $\eta = \frac{P_e}{P_r}$.

$$\eta = \frac{5 \times 0,400}{1\,000 \times 0,011} \text{ soit } \eta = 0,18 = 18 \%$$

20. La cellule au silicium

1. E_{\min} correspond à l'énergie minimale nécessaire aux électrons pour franchir la bande interdite.

2. D'après la relation donnée, on peut écrire :

$$\lambda = \frac{h \times c}{E_{\min}} \text{ donc } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,12 \times 1,60 \times 10^{-19}} \text{ soit } \lambda = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m} = 1,11 \text{ } \mu\text{m.}$$

3. Cette longueur d'onde appartient au domaine des infra-rouges.

21. La cellule triple jonction

1. Avec une cellule en silicium, un photon d'énergie 1,5 eV sera absorbé, mais seulement une énergie de 1,1 eV sera convertie sous forme d'énergie électrique.

Avec la cellule triple jonction, le photon traversera la première couche mais son énergie est trop faible pour qu'il soit absorbé. Il sera absorbé par la deuxième couche où une énergie de 1,4 eV sera convertie sous forme d'énergie électrique.

2. Il est important que les photons passent d'abord par la couche qui possède le gap le plus grand, car c'est ainsi qu'on aura le meilleur rendement. Si on inverse l'ordre des couches, tous les photons qui pourraient être absorbés le seraient dès la première couche, les deux autres couches n'auraient alors pas d'intérêt. On obtiendrait au maximum 1,0 eV.

22. Le projet Solar Impulse 2

Partie 1 : Le vol de jour

1. $P_s = 1,00 \times 10^3 \times S$ donc $P_s = 1,00 \times 10^3 \times 270$
soit $P_s = 270$ kW.

2. On déduit de la relation donnée : $P_e = \eta \times P_s$
donc $P_e = 0,230 \times 270$ soit $P_e = 62,1$ kW.

3. Il faudrait une puissance de : $4 \times 17,5 \times 0,736$ soit
51,5 kW donc la puissance P_e est suffisante.

4. On utilise la relation : $E = P \times \Delta t$ donc $\Delta t = \frac{E}{P}$, avec
 $P = \frac{P_e}{4} = 15,5$ kW.

$\Delta t = \frac{4 \times 38,5}{15,5} = 9,94$ soit $\Delta t \approx 10$ h.

5. Le jour l'avion est propulsé à l'énergie solaire.
La recharge des batteries permet le fonctionnement de nuit.

Partie 2 : Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin

1. Un rendement de 23 % ne peut pas être qualifié de « bon ». D'autres convertisseurs ont un rendement proche de 1.

2. De la relation donnée, on déduit l'expression :

$$\lambda = \frac{h \times c}{E_g} \text{ donc } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,12 \times 1,6 \times 10^{-19}}$$

soit $\lambda = 1,11 \times 10^{-6}$ m ; cette longueur d'onde appartient au domaine des infra-rouges.

3. Si $E_g \geq 1,12$ eV, soit $\lambda \leq 1,11 \times 10^{-6}$ m, les photons sont absorbés. La partie d'énergie utilisable est en bleu ciel et l'excès d'énergie perdue est en bleu foncé.

CHAPITRE 6 Les atouts de l'électricité

I. Introduction

Programme

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 procédés d'obtention d'énergie électrique sans combustion justifie le rôle central que cette forme d'énergie est amenée à jouer à l'avenir.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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). <p>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...).</p> <p>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 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - énergie chimique (accumulateurs) ; - énergie potentielle (barrages) ; - énergie électromagnétique (super-capacités). 	<p>Décrire des exemples de chaînes de transformations énergétiques permettant d'obtenir de l'énergie électrique à partir de différentes ressources primaires d'énergie.</p> <p>Calculer le rendement global d'un système de conversion d'énergie.</p> <p>Analyser des documents présentant les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques (métaux rares, etc.).</p> <p>Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique).</p>
<p>Prérequis et limites Les lois de l'électricité, les notions d'énergie et de puissance électriques ainsi que celles d'énergie cinétique et potentielle, déjà rencontrées, sont mobilisées. Aucune expression d'énergie stockée par un système donné n'est exigible.</p>	

Commentaires pédagogiques

L'énergie électrique joue un rôle majeur dans le développement de l'économie ; produire de l'électricité avec un faible impact écologique est nécessaire.

L'activité 1 expose un historique de la distribution de l'énergie électrique et montre les atouts de l'électricité. Les réseaux de distribution sont désormais étendus et pilotés à distance, les risques sont faibles et certaines méthodes de production n'émettent que peu de dioxyde de carbone, avec des conversions d'énergie qui tendent à avoir un rendement optimal. L'électricité est donc devenue incontournable. Mais la production mondiale d'électricité est majoritairement obtenue dans des centrales thermiques à flamme à partir de combustibles fossiles qui émettent du dioxyde de carbone, un des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Il est donc important que ces centrales disparaissent au profit de centrales où les conversions d'énergie se font sans combustion.

Ce chapitre traite des méthodes d'obtention d'énergie électrique sans combustion avec :

- la conversion de l'énergie mécanique directe dans les centrales hydroélectriques et indirecte dans les centrales nucléaires (activité 2) ;
- la conversion de l'énergie radiative du Soleil dans les centrales solaires photovoltaïques (activité 3) ;
- la conversion de l'énergie chimique dans les piles et accumulateurs (activité 4).

Ces différentes activités font largement intervenir les chaînes de transformations énergétiques. Les notions de formes d'énergie et de transferts d'énergie, bien que déjà traitées au cycle 4, doivent être employées avec justesse pour que les élèves comprennent que l'énergie électrique est une forme d'énergie qui n'est obtenue que par transfert. La notion de rendement d'un convertisseur qui a été abordée dans le chapitre précédent est réinvestie. Des calculs de rendements sont demandés aux élèves mais les expressions des énergies ou puissances nécessaires à ces calculs ne sont pas exigibles.

Ces quatre activités relèvent de l'objectif « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » avec l'objectif sous-jacent « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement » qui est développé plus particulièrement dans les activités 5 et 6.

Ces différentes méthodes d'obtention d'énergie électrique comportent néanmoins des risques sur l'environnement et la biodiversité : déchets radioactifs pour les centrales nucléaires, matériaux toxiques dans les batteries, etc. (activité 5).

L'électricité ne se stocke pas. Pour des énergies intermittentes, ou en cas de surproduction, le stockage de l'énergie est devenu un défi technologique majeur. On doit alors convertir l'énergie électrique sous d'autres formes d'énergie (potentielle de pesanteur, chimique ou électromagnétique) pour pouvoir la stocker (activité 6).

Objectifs

- Comprendre les enjeux du réseau électrique au XXI^e siècle.
- Identifier et comprendre les méthodes d'obtention d'énergie électrique qui ne nécessitent pas de combustion.
- Connaître les risques et les impacts sur l'environnement et la biodiversité de ces méthodes.
- Connaître et comparer les méthodes de stockage de l'énergie.

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 106

1. a et b
2. a, b et c
3. b et c
4. a et b

Activités p. 108-117

Activité 1. L'énergie électrique d'hier et de demain

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet aux élèves de connaître l'histoire de la distribution d'énergie électrique, et de savoir que les méthodes mises en œuvre pour la production d'électricité doivent nécessiter un

bon rendement global des systèmes et émettre le moins possible de CO₂.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Au début où le courant alternatif a circulé, il ne parcourait les lignes que sur quelques dizaines de kilomètres. Des moyens techniques ont dû être trouvés pour distribuer l'énergie électrique sur de longues distances. De nombreuses sociétés privées étaient distributrices d'énergie électrique. L'interconnexion des réseaux puis la nationalisation du réseau électrique français ont permis de distribuer l'énergie électrique d'origine thermique ou hydraulique sur la totalité du territoire.

2. De nos jours, les industries, les entreprises et les particuliers consomment de l'énergie électrique dans la quasi-totalité de leurs activités. De plus en plus utilisée (éclairage, chauffage, appareils électroménagers, ordinateurs...), l'électricité est devenue incontournable.

3. Les productions d'énergie électrique d'origine nucléaire, hydraulique, éolienne ou même photovoltaïque sont celles qui émettent le moins de CO₂.

4. Pour limiter les pertes d'énergie le plus possible, il est nécessaire d'obtenir un rendement global le plus proche de 1.

Synthèse

Les méthodes d'obtention d'énergie électrique et de sa distribution doivent être mises en œuvre avec un bon rendement global. Les énergies renouvelables doivent être développées et la production d'électricité doit être adaptée à la consommation des utilisateurs.

Activité 2. Les centrales électriques

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet de comparer deux types de centrales électriques : une centrale hydroélectrique et une centrale nucléaire. Pour cela, nous avons souhaité prendre des exemples précis, la centrale de Tignes et celle de Flamanville. Nous proposons un travail en équipes en parcours 2 pour que les élèves n'aient qu'un seul type de centrale à étudier ; les résultats sont ensuite mis en commun et comparés.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Dans une centrale hydroélectrique, c'est l'écoulement de l'eau qui permet l'obtention d'énergie électrique. Dans une centrale nucléaire, les transformations nucléaires sont à l'origine de l'obtention d'énergie électrique. Dans les deux cas aucune combustion n'est réalisée.

2. Dans la centrale hydroélectrique, l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau retenue dans le barrage est convertie en énergie cinétique par l'écoulement de l'eau dans les conduites forcées ; l'eau fait tourner la turbine qui entraîne l'alternateur qui produit l'électricité ; l'énergie électrique est transférée vers le réseau de transport électrique.

Dans une centrale nucléaire, la fission des noyaux dans le réacteur libère de l'énergie thermique ; cette énergie permet de vaporiser de l'eau ; l'énergie cinétique de la vapeur produite fait tourner la turbine qui entraîne l'alternateur qui produit l'électricité ; l'énergie électrique est transférée vers le réseau de transport électrique.

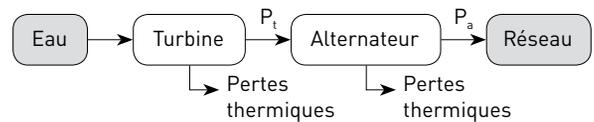
La vapeur d'eau passe dans le condenseur du circuit de refroidissement. Des échanges d'énergie se font entre la vapeur d'eau et l'eau froide du

circuit de refroidissement. La vapeur d'eau redevient liquide et repart dans le circuit du générateur de vapeur. L'eau chaude du circuit de refroidissement part dans la tour de refroidissement.

De l'énergie thermique est perdue à chacun des maillons de la chaîne de transformations énergétiques.

3. La centrale de Flamanville est une centrale nucléaire, celle de Tignes-Malgovert une centrale hydroélectrique.

Pour la centrale hydroélectrique :



$$P_{\text{eau}} = \frac{E_{\text{pp}}}{\Delta t} = \frac{mgh}{\Delta t} = \frac{\rho Vgh}{\Delta t} = \rho Dgh$$

$$= 1\,000 \times 48 \times 9,8 \times 750$$

$$= 3,5 \times 10^8 \text{ W} = 350 \text{ MW}$$

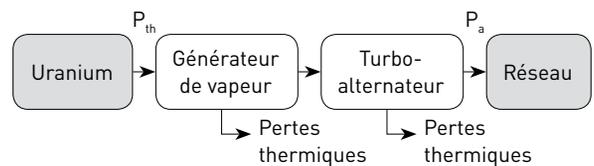
Dans la turbine, la puissance utile est la puissance P_t et la puissance reçue est P_{eau} .

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_r} \text{ soit } \eta_t = \frac{320}{350} = 0,91 = 91 \%$$

Le rendement global de la centrale est égal au produit des rendements :

$$\eta = \eta_t \times \eta_a = 0,91 \times 0,98 = 0,89 = 89 \%$$

Pour la centrale nucléaire :



La puissance utile est la puissance électrique P_a transférée au réseau, la puissance reçue est la puissance thermique produite par le réacteur :

$$\eta = \frac{P_u}{P_r} = \frac{2\,760}{7\,600} = 0,36 = 36 \%$$

4. Utiliser l'énergie perdue pour le chauffage urbain permet de récupérer partiellement l'énergie thermique perdue lors des différents transferts. L'énergie perdue représente 64 % de l'énergie produite par le réacteur nucléaire. On évite ainsi le réchauffement des fleuves ou de la mer, qui modifie les écosystèmes.

Synthèse

La puissance produite par la centrale hydroélectrique vaut : $P_{\text{Tig}} = \eta_a \times P_t$.

$$P_{\text{Tig}} = 0,98 \times 320 \text{ soit } P_{\text{Tig}} = 310 \text{ MW.}$$

$$N = \frac{P_{\text{Fla}}}{P_{\text{Tig}}} = \frac{2\,760}{310} = 8,9.$$

Il faudrait donc 9 centrales hydroélectriques comme celle de Tignes pour égaler en puissance la centrale nucléaire de Flamanville. Or les sites propices à l'installation de centrales hydroélectriques sont peu nombreux et ces centrales, bien qu'elles n'émettent pas de gaz à effet de serre, ont un impact écologique important.

Activité 3. Les centrales solaires photovoltaïques

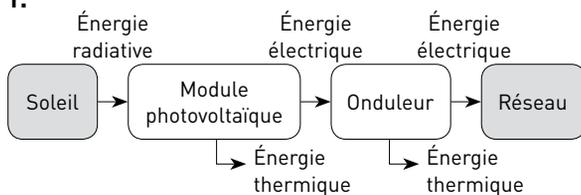
• **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

Comme dans l'activité précédente, nous avons souhaité faire travailler les élèves sur un exemple précis, la centrale de Cestas. Le rendement de la centrale est calculé puis les élèves doivent déduire du résultat et des documents les avantages et les inconvénients d'une centrale photovoltaïque.

• **Corrigés du guide de travail**

1.



2. a. L'énergie radiative reçue par an, pour une puissance rayonnée de $1\,350 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ est :

$$E_r = 1\,350 \times 10^3 \times S$$

$$\text{donc } E_r = 1\,350 \times 10^3 \times 200 \times 10^4$$

$$\text{soit } E_r = 2,70 \times 10^{12} \text{ Wh.}$$

L'énergie électrique E obtenue par an est :

$$E = P \times \Delta t \text{ donc } E = 300 \times 10^6 \times 2\,035$$

$$\text{soit } E = 6,11 \times 10^{11} \text{ Wh.}$$

b. Le rendement de la centrale est donné par la

$$\text{relation : } \eta = \frac{E}{E_r} \text{ soit } \eta = \frac{6,11 \times 10^{11}}{2,70 \times 10^{12}} = 0,226 = 22,6 \%$$

Remarque : la puissance $P = 300 \text{ MW}$ est la puissance de crête de la centrale de Cestas. Les résultats sont donc surestimés par rapport à la réalité.

Synthèse

Les avantages et inconvénients d'une centrale photovoltaïque sont donnés dans le tableau suivant.

Avantages	Inconvénients
Solution économique et respectueuse de l'environnement.	Rendement faible. Exploitation qui occupe une grande surface au sol. Nécessité de l'implanter dans une région ensoleillée.

Activité 4. Piles et accumulateurs

• **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

Cette activité peut être envisagée sous forme de TP pour que les élèves construisent une pile et vérifient qu'elle délivre un courant continu. Nous avons préféré la pile à pomme de terre à la pile au citron pour susciter plus d'intérêt.

Résultats de l'expérience :

La borne + de la pile est la lame de cuivre, la borne – de la pile est la lame de zinc.

Nous avons utilisé 4 demi pommes de terre (Bintje) et avons obtenu une tension de l'ordre de 1,7 V.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Le courant délivré par une pile ou une batterie est continu car les piles et batteries possèdent des bornes positives et négatives.

2. Le schéma du doc 2 montre que :

– les porteurs de charges à l'intérieur d'une pile ou d'une batterie sont les ions (H^+ pour la pile à hydrogène) ;

– les porteurs de charges dans le circuit extérieur à une pile ou à une batterie sont des électrons.

3. D'après le doc 2, une pile en fonctionnement produit de l'eau qui est évacuée à l'extérieur de la pile. Une pile n'est donc pas rechargeable.

D'après le doc 3, on voit qu'à la recharge de la batterie, les réactifs sont ceux des produits obtenus lors de sa décharge.

Donc seules les batteries sont rechargeables.

Synthèse

Une pile ou une batterie sont des réservoirs d'énergie chimique. Quand elles sont en fonctionnement, il y a transfert d'énergie sous forme d'énergie électrique.

Activité 5. Risques et impacts sur l'environnement et la biodiversité

• **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

L'activité consiste à comparer les risques et les impacts sur l'environnement et la biodiversité de trois méthodes d'obtention d'énergie électrique sans combustion : le nucléaire, l'éolien et les batteries. Nous proposons un parcours 2 en équipes de 3 élèves où chaque élève étudierait une seule méthode pour ensuite mettre les résultats en commun avec les autres membres de l'équipe.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Les méthodes d'obtention d'énergie électrique émettant le moins de CO₂ sont d'origine hydraulique, nucléaire, éolienne ou solaire.

2. Dans une centrale nucléaire, la fission de noyaux lourds génère de l'énergie thermique qui permet la vaporisation d'eau. La vapeur d'eau met en rotation une turbine couplée à un alternateur qui produit l'énergie électrique transférée sur le réseau.

Dans une éolienne, l'énergie cinétique du vent fait tourner les pales d'un rotor couplé à un générateur.

L'énergie chimique d'une batterie est transférée sous forme d'énergie électrique quand elle est en fonctionnement.

Ces trois méthodes d'obtention d'énergie électrique se font donc sans combustion.

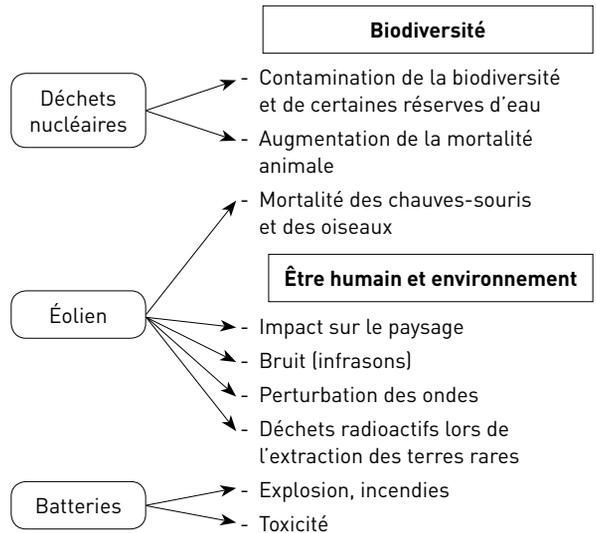
3. Les déchets d'activité radioactive moyenne (3 %) ou élevée (0,2 %) associée à des durées de vie parfois longues sont dangereux. En effet, ils se désintègrent pendant plusieurs centaines, voire milliers d'années et peuvent contaminer l'environnement.

4. Une source d'énergie renouvelable est une source d'énergie dont le renouvellement naturel se fait assez rapidement pour qu'elle puisse être considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. L'éolien utilise l'énergie du vent : il s'agit d'une source d'énergie renouvelable. L'énergie d'origine éolienne répond bien à la définition d'une source d'énergie renouvelable. Cependant, la production et l'implantation des éoliennes nécessitent beaucoup d'énergie et de matières premières qui ne sont pas extraites de façon sécurisée.

5. La batterie qui semble la plus adaptée au vélo électrique est la batterie de type NiMH. Elle a une

haute densité d'énergie et ne présente pas de toxicité.

Synthèse



Activité 6. Le stockage de l'énergie

• **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

L'activité consiste à comparer trois méthodes de stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de pesanteur, d'énergie chimique et d'énergie électromagnétique. La notion d'énergie électromagnétique étant nouvelle pour les élèves, nous avons souhaité leur montrer par l'expérience qu'un condensateur était un réservoir d'énergie électrique. Cette expérience peut être montrée en cours par le professeur ou avec la vidéo.

Résultats de l'expérience :

Lorsque le commutateur est en position 1, la tension aux bornes du condensateur passe rapidement de 0 à la valeur E.

Lorsqu'on ouvre le commutateur, la tension aux bornes du condensateur est égale à E ; le condensateur est chargé, il a emmagasiné de l'énergie électrique.

Lorsque le commutateur est en position 2, le moteur tourne et la masse de 100 g monte ; la tension aux bornes du condensateur diminue, le condensateur se décharge, il restitue l'énergie électrique emmagasinée.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Les pertes ont pour valeur :

$$\text{Pertes} = 1\,700 - 1\,420 \text{ soit } \text{Pertes} = 280 \text{ GWh.}$$

2. Pour calculer la densité énergétique, on divise la valeur de l'énergie par celle de la masse de la batterie :

$$\text{Densité énergétique} = \frac{14 \times 10^3}{114}$$

soit $1,2 \times 10^2 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3. Quand le condensateur se charge, il emmagasine de l'énergie. Lorsqu'on ouvre le commutateur, le condensateur a donc emmagasiné de l'énergie électrique. Quand le moteur tourne, le condensateur restitue l'énergie électrique emmagasinée. Un condensateur peut emmagasiner puis restituer de l'énergie électrique, il se comporte donc comme un réservoir d'énergie électrique.

4.

Dispositif de stockage	STEP	Batteries	Super-condensateur
Masses mises en jeu	Très grandes	Quelques kg à quelques centaines de kg	Quelques kg
Capacité de stockage	Très grande (1 420 GWh par an)	Petite ($1,2 \times 10^2 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Très faible (4 à 6 $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Durée de stockage	Longue	Courte	Très courte
Impact écologique	Pertes importantes (280 GWh soit 16,5 %)	Durée de vie limitée donc fort impact écologique	Durée de vie importante donc faible impact écologique

Synthèse

Malgré des pertes importantes, la STEP est le seul moyen proposé dans cette activité permettant de stocker de très grandes quantités d'énergie. Les batteries ont un fort impact écologique (conception, durée de vie limitée). Les super-condensateurs ont une très faible capacité de stockage mais représentent peut-être une solution d'avenir car leur impact écologique est faible (durée de vie importante).

Se tester p. 120

1. **a. Vrai b. Vrai c. Faux d. Faux**

2. A : énergie mécanique
 B : énergie thermique
 C : énergie électrique
 D : énergie thermique

E : énergie rayonnante

3. **a. Vrai b. Vrai c. Faux d. Vrai**

4. 1. a ; 2. b ; 3. b ; 4. a

Travailler des compétences scientifiques p. 121

5. Apprendre à analyser et comparer des données en argumentant

Erratum : des erreurs de calculs dans la résolution de l'exercice étaient présentes dans le spécimen du manuel. Elles ont été corrigées lors de la réimpression. Vous pouvez retrouver la bonne version ci-dessous.

Étape 1. Calculer la valeur du quotient des masses données

$$\frac{m_{\text{Plomb}}}{m_{\text{Li-ion}}} = \frac{13\,000}{325} = 40.$$

La batterie au plomb a une masse 40 fois supérieure à celle de la batterie Li-ion.

Étape 2. Convertir les masses en kilogrammes

$m = 13 \text{ kg}$ pour la batterie au plomb et $m = 0,325 \text{ kg}$ pour la batterie Li-ion.

Étape 3. Calculer les valeurs des capacités de stockage

$E = 504 \text{ Wh}$ pour la batterie au plomb, $E = 67 \text{ Wh}$ pour la batterie Li-ion.

Étape 4. Calculer la valeur du quotient des capacités de stockage

$$\frac{E_{\text{Li-ion}}}{E_{\text{Plomb}}} = \frac{67}{504} \approx 0,13.$$

Une batterie Li-ion de 325 g stocke sept fois moins d'énergie qu'une batterie au plomb de 13 kg. L'énergie massique d'une batterie Li-ion est donc supérieure à celle d'une batterie au plomb.

Étape 5. Calculer la valeur de la masse d'une batterie au Li-ion équivalente

$$m = \frac{0,325 \times 504}{67} \text{ soit } m \approx 2,4 \text{ kg.}$$

La masse de la batterie Li-ion qui peut fournir la même capacité de stockage qu'une batterie au plomb est six fois plus petite, ce qui pourrait constituer un avantage important pour les voitures électriques.

6. Analyser et comparer des données en argumentant

Batteries	Ni-Cd	Ni-MH
Tension (en V)	1,2	1,2
Masse m (en g)	20	28
Charge électrique (en mAh)	600	2 300
Capacité de stockage (en mW · h)	$600 \times 1,2 = 720$	$2\,300 \times 1,2 = 2\,760$
Densité énergétique (en mW · h/g)	$\frac{720}{20} = 36$	$\frac{2\,760}{28} = 99$
Nombre de charges /décharges	700	500

On constate que la tension, la masse et le nombre de charges et décharges sont proches. Cela ne constituera donc pas un argument pour trancher en faveur de l'un ou l'autre type de batterie.

En revanche, la capacité de stockage et la densité énergétique de la batterie Ni-MH sont beaucoup plus élevées que celles de la batterie Ni-Cd. Ainsi, pour des raisons énergétiques, il vaut mieux choisir les batteries Ni-MH.

Appliquer

p. 122

7. Les enjeux énergétiques au XXI^e siècle

1. Pour réduire les dépenses en énergie et l'effet de serre en conséquence, les enjeux énergétiques du XXI^e siècle sont :

- produire de l'électricité avec le moins de CO₂ possible ;
- avoir un rendement de conversion énergétique optimal ;
- adapter la production à la consommation.

2. Le réseau intelligent ou *smart grid* est un réseau numérique permettant d'adapter la production d'électricité à la consommation et de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le réchauffement climatique.

8. Le rendement d'une centrale

Le rendement global de la centrale est donné par

la relation : $\eta = \frac{E_{\text{élec}}}{E_{\text{méca}}}$.

9. Les transformations énergétiques sans combustion

1. Dans une centrale nucléaire, l'énergie thermique issue de la fission des noyaux est transformée en énergie mécanique puis en énergie électrique. Il y a des pertes thermiques.

Dans une centrale solaire photovoltaïque, l'énergie radiative reçue du Soleil est transformée en énergie électrique. Il y a des pertes thermiques.

2. Ces méthodes d'obtention ne nécessitent pas de combustion. Une combustion libère de l'énergie thermique mais l'énergie thermique libérée dans un réacteur nucléaire est due à une transformation nucléaire.

10. Les batteries au cadmium

Les pictogrammes du cadmium indiquent qu'il est CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique), inflammable et dangereux pour le milieu aquatique, ce qui justifie la décision prise par le Parlement européen.

11. Les passes à poissons

La législation oblige à construire des passes à poissons pour contourner les barrages. Ce sont des bassins reliés entre eux par de petites chutes d'eau que les poissons peuvent franchir sans peine. Si ces passes n'existaient pas, les poissons chuteraient de hauteurs importantes et n'y survivraient pas.

12. Les procédés de stockage de l'énergie

1. L'énergie électrique ne peut pas être stockée, elle ne peut qu'être transférée. Elle doit donc être convertie pour être stockée.

2. On dispose des STEP, de batteries et de supercapacités (ou supercondensateurs) où l'énergie est stockée respectivement sous forme d'énergie potentielle de pesanteur, d'énergie chimique et d'énergie électromagnétique.

3. L'énergie en surplus permet par pompage de remonter l'eau du bassin inférieur au bassin supérieur. L'énergie électrique est transformée en énergie potentielle de pesanteur. Le système utilisé est la STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage).

S'entraîner

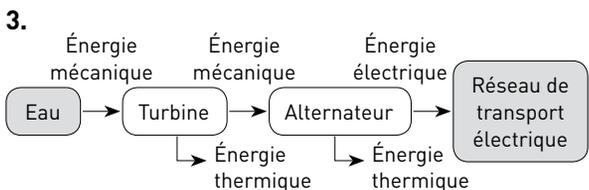
p. 123-124

13. Chaîne de transformations énergétiques

La **personne** sur la bicyclette transmet de l'énergie à la **roue** qui possède alors de l'**énergie mécanique**. La roue tourne et entraîne la **dynamo** dans un mouvement de rotation. L'énergie mécanique est alors convertie en **énergie électrique**. Puis l'énergie électrique est transformée en **énergie rayonnante** et en **énergie thermique** dans la lampe ; la **lampe** brille et éclaire le **chemin**.

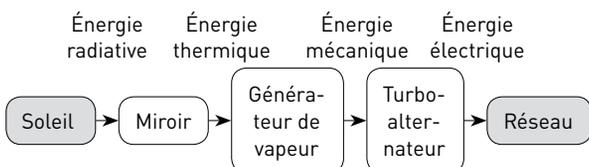
14. La centrale géothermique de Bouillante (Guadeloupe)

1. Cette ressource d'énergie est renouvelable car elle provient d'un phénomène naturel inépuisable.
2. L'étymologie vient du grec « géo » qui signifie « terre » et « thermo » qui signifie « chaud ». La centrale utilise la chaleur (énergie thermique) provenant du sous-sol.



4. Le rendement global est donné par la relation : $\eta = \eta_a \times \eta_t$.
5. $\eta = 0,95 \times 0,35 = 0,33$ soit 33 %.
6. La puissance dissipée au niveau de la turbine a pour expression : $P_t = P \times (1 - \eta_t)$ donc $P_t = 15 \times (1 - 0,35)$ soit $P_t = 9,8$ MW. La puissance transmise à l'alternateur est $15 - 9,8$ soit 5,2 MW. La puissance dissipée au niveau de l'alternateur est : $P_a = 5,2 \times (1 - 0,95)$ soit $P_a = 0,3$ MW.

15. Les centrales solaires thermiques



16. L'hydrolienne : l'éolienne des mers

1. Les courants marins entraînent un rotor couplé à un alternateur qui produit de l'électricité. L'énergie mécanique des courants est transférée au rotor couplé à l'alternateur ; l'alternateur transfère de l'énergie électrique au réseau électrique.

2. Le rendement est donné par la relation :

$$\eta = \frac{P_e}{P_m}$$

3. Sachant que $P_e = 10 P_a$, alors :

$$P_m = \frac{10 P_a}{\eta} \text{ donc } P_m = \frac{10 \times 2}{0,45} \text{ soit } P_m = 44 \text{ MW.}$$

17. La Belgique, pionnière pour le stockage des déchets en couche d'argile

1. Les puits sont en A, C et E. Les galeries sont en B, C, D et F.
2. Les expériences n'ont pu être réalisées que lorsque l'analyse des couches géologiques et de la faisabilité ont été faites.
3. Avec la connaissance du comportement de l'argile pour le stockage des déchets nucléaires, le creusement de la galerie D a pu se faire puis celle du puits E et de la galerie de liaison F puis la galerie G.

18. Une batterie de stockage

1. V est le symbole du volt, une unité de tension. Ah est le symbole de l'ampère-heure, une unité de charge électrique pour une pile ou une batterie. Wh est le symbole du wattheure, une unité d'énergie électrique. kg est l'unité du kilogramme, l'unité de base de la masse.

2. L'énergie massique E_m de la batterie est le quotient de l'énergie électrique et de la masse :

$$E_m = \frac{1\,200}{29,5} \text{ soit } E_m = 41 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

19. L'énergie massique

	Supercondensateur	Batterie lithium-ion
Temps de charge	5 s	4 h
Énergie massique	$\frac{1/2 \times 3\,000 \times 3,0^2}{0,520}$ soit $2,6 \times 10^4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\frac{3,6 \times 2,9 \times 3\,600}{0,047}$ soit $8,0 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Le supercondensateur a un temps de charge bien inférieur à celui de la batterie lithium-ion. Par contre, la batterie lithium-ion a une énergie mas- sique beaucoup plus importante que le super- condensateur.

Vers le bac

p. 125

20. En série et/ou en dérivation ?

Partie 1 : la chaîne de transformations énergétiques

1. Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie radiative du Soleil en énergie électrique et en énergie thermique. Le courant étant continu, un onduleur le convertit en courant alternatif afin de transférer l'énergie électrique obtenue dans le réseau.

2. La surface S est donnée par la relation: $S = L \times \ell$.
 $S = 1,082 \times 0,796$ soit $S = 0,861 \text{ m}^2$.

3. Le rendement d'un panneau photovoltaïque est donné par la relation :

$$\eta_p = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{radiative}}}$$

On a donc $\eta_p = \frac{145}{0,861 \times 1\,000} = 0,168$ ou 16,8 %.

4. Le rendement de l'installation est égal au pro- duit des deux rendements soit :

$$\eta = 0,98 \times 0,168 = 0,165 \text{ ou } 16,5 \%$$

Partie 2 : la disposition des panneaux

5. Quand deux panneaux sont disposés en série, la tension aux bornes de l'ensemble a la valeur $2U$ et le courant parcourant l'ensemble a une intensité de valeur I .

6. On doit disposer de $N_1 = \frac{48}{19,7} = 2,4$ soit 3 pan- neaux en série.

7. Quand deux panneaux sont disposés en dériva- tion, la tension aux bornes de l'ensemble a la valeur U et le courant parcourant l'ensemble a une intensité de valeur $2I$.

On doit disposer de $N_2 = \frac{16}{7,36} = 2,2$

soit 3 panneaux en dérivation.

Le nombre total de panneaux est :

$$N = N_1 \times N_2 \text{ soit } N = 3 \times 3 = 9.$$

Partie 3 : la consommation électrique

9. $P_{\text{disp}} = 9 \times 145$ soit $P_{\text{disp}} = 1,31 \times 10^3 \text{ W} = 1,31 \text{ kW}$.

10. $P_{\text{disp}} < P_e$. Elle ne pourra pas être en auto- consommation.

CHAPITRE 7 Optimisation du transport de l'électricité

I. Introduction

Programme

La minimisation des pertes par effet Joule dans la distribution d'électricité le long d'un réseau entre dans le cadre général des problèmes mathématiques de transport et d'optimisation sous contraintes. Ces problèmes, très difficiles à résoudre car non linéaires, nécessitent des traitements numériques lorsqu'ils mettent en jeu un nombre important d'inconnues ou de données.

Présentés ici dans le cadre du transport d'électricité, les graphes sont des modèles mathématiques utilisés pour traiter des problèmes relevant de domaines variés : transport d'information dans un réseau informatique, réseaux sociaux, transactions financières, analyses génétiques, etc.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Au cours du transport, une partie de l'énergie électrique, dissipée dans l'environnement par effet Joule, ne parvient pas à l'utilisateur.</p> <p>L'utilisation de la haute tension dans les lignes électriques limite les pertes par effet Joule, à puissance transportée fixée.</p>	<p>Faire un schéma d'un circuit électrique modélisant une ligne à haute tension.</p> <p>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.</p>
<p>Un réseau de transport électrique 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 intermédiaires et les cibles destinataires.</p> <p>Dans ce modèle, l'objectif est de minimiser les pertes par effet Joule sur l'ensemble du réseau sous les contraintes suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'intensité totale sortant d'une source est limitée par la puissance maximale distribuée ; - l'intensité totale entrant dans chaque nœud intermédiaire est égale à l'intensité totale qui en sort ; - l'intensité totale arrivant à chaque cible est imposée par la puissance qui y est utilisée. 	<p>Modéliser un réseau de distribution électrique simple par un graphe orienté. Exprimer mathématiquement les contraintes et la fonction à minimiser.</p> <p>Sur l'exemple d'un réseau comprenant 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.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Les relations quantitatives associées à l'effet Joule sont connues pour le courant continu. Elles sont admises ou fournies pour le courant alternatif. La notion de facteur de puissance est hors programme.</p> <p>La notion de graphe, abordée dans l'enseignement de sciences numériques et technologie de seconde, est ici mobilisée.</p> <p>Il convient d'insister sur la différence entre les deux types de modèles introduits dans ce sous-thème, le modèle de circuit électrique et le modèle mathématique de graphe.</p> <p>Les connaissances sur les fonctions sont mobilisées.</p>	

Commentaires pédagogiques

Le réseau de transport, de répartition et de distribution électrique en France est dense et très étendu. Le réseau de distribution électrique est constitué de plus d'un million de kilomètres de lignes qui s'échauffent lors du passage du courant électrique. L'effet Joule engendre d'une part des pertes en puissance, ce qui impose aux sources distributrices de fournir des puissances plus importantes, et d'autre part ces pertes se font sous forme de chaleur, donc avec un impact sur le réchauffement climatique.

Il est alors nécessaire d'optimiser le transport de l'électricité pour minimiser ces pertes.

Ce chapitre comporte deux activités. L'activité 1 met en avant l'objectif de formation « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement » et l'activité 2 l'objectif de formation « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques ».

L'activité 1 permet aux élèves de comprendre pourquoi le transport de l'électricité doit se faire en très haute tension pour limiter l'effet Joule. Les relations entre tension, intensité, résistance et puissance vues au cycle 4 puis en seconde sont réinvesties. Les relations sur l'effet Joule connues en courant continu sont admises en courant alternatif. La notion de facteur de puissance n'est pas au programme.

L'activité 2 a pour objectif de minimiser ces pertes par effet Joule par une résolution mathématique dans un cas simple : un réseau de distribution constitué de deux sources distributrices, un nœud intermédiaire et deux cibles destinatrices. Le réseau est modélisé par un graphe orienté : les sources distributrices, les cibles destinatrices et le nœud intermédiaire constituent les sommets du graphe, les lignes étant modélisées par les arcs. À partir des puissances fournies ou dissipées, on obtient une fonction du second degré en fonction de l'intensité du courant circulant entre une cible et le nœud qu'il faut minimiser. La résolution mathématique peut se faire en utilisant le logiciel GeoGebra, en dérivant la fonction déterminée, etc. Une fiche mathématique dédiée, « Déterminer le minimum d'une fonction », est disponible à la fin du manuel et présente quelques méthodes pour minimiser une fonction du second degré. Les valeurs des intensités des courants partant des sources distributrices peuvent être ou ne pas être en adéquation avec les contraintes imposées sur le circuit par les puissances maximales fournies par les sources distributrices et celles imposées par les cibles destinatrices. Il appartient aux élèves de conclure.

La notion de graphe vue en seconde en SNT et les connaissances sur les fonctions sont réinvesties. Le professeur veillera à ce que les élèves fassent la distinction entre le modèle de circuit électrique et le modèle de graphe orienté.

Objectifs

- Savoir qu'au cours du transport de l'électricité dans les lignes électriques une partie de l'énergie est dissipée dans l'environnement.
- Connaître l'utilisation de la très haute tension dans les lignes électriques pour limiter les pertes par effet Joule.
- Modéliser un réseau électrique par un graphe orienté.
- Savoir minimiser les pertes par effet Joule avec les contraintes imposées.

BIBLIOGRAPHIE

► Sites Internet

- La théorie des graphes pour tous : <https://graphes.fr/index.html>
- Introduction à la théorie des graphes :
http://yallouz.arie.free.fr/terminale_cours/graphes/graphes.php
- Introduction à la théorie des graphes :
<https://www.imo.universite-paris-saclay.fr/~ruette/mathdiscret/polygraph-Sigward.pdf>
- Pour contextualiser : des graphes pour planifier le déconfinement ? :
<https://lejournal.cnrs.fr/articles/des-graphes-pour-planifier-le-deconfinement>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 126

1. a et c
2. a et c
3. a et b
4. b

Activités p. 128-131

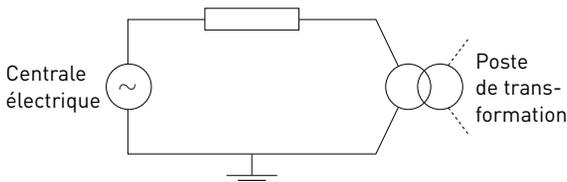
Activité 1. Le transport de l'électricité

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité avec une expérience simple permet aux élèves de comprendre pourquoi on utilise des lignes à très haute tension pour le transport de l'électricité. Les observations sont ensuite validées par des calculs.

- **Corrigés du guide de travail**

1.



2. La lampe brille faiblement lorsqu'elle reliée directement au générateur par la ligne basse tension. L'intensité du courant dans le circuit est plus faible qu'elle ne devrait l'être du fait qu'il y ait deux conducteurs ohmiques placés en série avec la lampe. La lampe brille normalement lorsqu'on interpose une ligne aux bornes de laquelle la tension est plus élevée entre deux transformateurs.

3. On a les relations :

$$P_J = R \times I^2; P_J = \frac{U^2}{R}$$

La valeur de I étant fixée, P_J est proportionnel à R .
La valeur de U étant fixée, P_J est inversement proportionnel à R .

La valeur de R étant fixée, P_J est proportionnel à I^2 ou à U^2 .

4. On a la relation : $P_1 = U_1 \times I_1$ d'où $I_1 = \frac{P_1}{U_1}$ donc

$$I_1 = \frac{1\,200 \times 10^6}{20 \times 10^3} \text{ soit } I_1 = 6,0 \times 10^4 \text{ A.}$$

On a la relation : $P_2 = U_2 \times I_2$ d'où $I_2 = \frac{P_2}{U_2}$ donc

$$I_2 = \frac{1\,200 \times 10^6}{400 \times 10^3} \text{ soit } I_2 = 3,0 \times 10^3 \text{ A.}$$

Les puissances dissipées par effet Joule sont alors respectivement :

$$P_{J1} = R \times I_1^2 \text{ donc } P_{J1} = 1,0 \times (6,0 \times 10^4)^2 \text{ soit } P_{J1} = 3,6 \times 10^9 \text{ W.}$$

$$P_{J2} = R \times I_2^2 \text{ donc } P_{J2} = 1,0 \times (3,0 \times 10^3)^2 \text{ soit } P_{J2} = 9,0 \times 10^6 \text{ W.}$$

On remarque que P_{J2} est très inférieur à P_{J1} .

Synthèse

On observe que les pertes par effet Joule sont beaucoup moins importantes lorsque la tension aux bornes de la ligne est plus grande. On a donc intérêt, pour limiter les pertes, à utiliser des lignes à très haute tension.

Activité 2. Réseau électrique et effet Joule

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

L'activité consiste à montrer aux élèves que les pertes par effet Joule dans les lignes doivent être prévues et compensées par les sources pour qu'elles délivrent des courants d'intensités suffisantes.

Nous avons choisi de modéliser le plus simplement possible le réseau de distribution électrique. L'arc est orienté à son extrémité, afin que les élèves ne fassent pas la confusion entre un circuit électrique et un graphe orienté, et les puissances dissipées par effet Joule sont indiquées sur les arcs.

Nous aidons les élèves pas à pas pour qu'ils puissent répondre aux questions de cette activité difficile.

- **Corrigés du guide de travail**

1. 1 et 2 représentent les sources distributrices ; 5 représente le nœud intermédiaire ; 3 et 4 représentent les cibles destinataires.

$$2. P_3 = U_3 \times I_3 \text{ et } P_4 = U_4 \times I_4.$$

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \text{ (loi des nœuds).}$$

$$P_{1\max} = U_1 \times I_{1\max} \text{ et } P_{2\max} = U_2 \times I_{2\max}.$$

$$3. I_{1\max} = \frac{P_{1\max}}{U_1} \text{ donc } I_{1\max} = \frac{15\,000}{280} \text{ soit } I_{1\max} = 53,6 \text{ A.}$$

$$I_{2\max} = \frac{P_{2\max}}{U_2} \text{ donc } I_{2\max} = \frac{6\,000}{270} \text{ soit } I_{2\max} = 22,2 \text{ A.}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3} \text{ donc } I_3 = \frac{6\,000}{230} \text{ soit } I_3 = 26,1 \text{ A.}$$

$$I_4 = \frac{P_4}{U_4} \text{ donc } I_4 = \frac{9\,000}{230} \text{ soit } I_4 = 39,1 \text{ A.}$$

4. On ne peut pas modifier les pertes sur les lignes qui rejoignent chaque cible destinataire car l'intensité du courant qui arrive à une cible est imposée par la puissance consommée et la tension d'alimentation de la cible.

5. a. On a la relation :

$$P_J = P_{J1} + P_{J2} = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times I_2^2$$

$$\text{b. } I_1 + I_2 = I_3 + I_4 \text{ donc } I_1 + I_2 = 26,1 + 39,1 \\ \text{soit } I_1 + I_2 = 65,2 \text{ A. } I_2 = 65,2 - I_1.$$

Donc $P_J = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times (65,2 - I_1)^2$ avec $R_1 = 0,2 \, \Omega$ et $R_2 = 0,4 \, \Omega$.

$$P_J = 0,2 \times I_1^2 + 0,4 \times (65,2 - I_1)^2 \\ = 0,6 \times I_1^2 - 52,2 \times I_1 + 1\,700,4.$$

On a donc :

$$f(I_1) = 0,6 \times I_1^2 - 52,2 \times I_1 + 1\,700,4$$

6. f passe par un minimum si sa dérivée par rapport à I_1 est nulle donc si $1,2 \times I_1 - 52,2 = 0$

$$\text{soit } I_1 = \frac{52,2}{1,2} \text{ d'où } I_1 = 43,5 \text{ A. } I_1 \text{ est inférieure à } I_{1\max}.$$

$$I_2 = 65,2 - I_1 = 65,2 - 43,5 \text{ d'où } I_2 = 21,7 \text{ A. } I_2 \text{ est inférieure à } I_{2\max}.$$

f admet donc un minimum dans l'intervalle $[0; I_{1\max}]$.

$$P_{\min} = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times I_2^2 \text{ donc}$$

$$P_{\min} = 0,2 \times 43,5^2 + 0,4 \times 21,7^2 \text{ soit } P_{\min} = 566,8 \text{ W.}$$

$$7. I_{1\max} = \frac{P_{1\max}}{U_1} \text{ donc } I_{1\max} = \frac{10\,000}{280} \text{ soit } I_{1\max} = 35,7 \text{ A.}$$

$$I_{2\max} = \frac{P_{2\max}}{U_2} \text{ donc } I_{2\max} = \frac{8\,000}{270} \text{ soit } I_{2\max} = 29,6 \text{ A.}$$

Les calculs des questions 5 et 6 restent les mêmes car les cibles destinataires et les résistances des lignes sont les mêmes. On obtient ainsi $I_1 = 43,5 \text{ A}$. Mais I_1 est supérieure à $I_{1\max}$. La fonction f n'admet donc pas de minimum dans l'intervalle $[0; I_{1\max}]$.

En physique, cela signifie que les sources ne peuvent pas délivrer des courants d'intensités suffisantes pour que les cibles soient correctement alimentées.

Synthèse

On détermine les intensités des courants consommés par chaque cible et les intensités maximales des courants qui peuvent être délivrés par les sources.

Avec la loi des nœuds, on connaît la somme des intensités des courants qui doivent être délivrés par les sources.

On détermine la relation qui donne la puissance perdue sur les lignes d'alimentation en fonction des intensités des courants délivrés par les sources. On obtient une fonction du type $f(x) = ax^2 + bx + c$ avec $x = I_1$.

On détermine la valeur de I_1 pour laquelle cette fonction admet un minimum et on en déduit la valeur de I_2 . Si $I_1 < I_{1\max}$ et si $I_2 < I_{2\max}$, on calcule la valeur de la puissance minimale perdue par effet Joule.

Se tester

p. 134

1. a. Faux b. Faux c. Faux d. Vrai
2. d
3. a. Circuit électrique
b. Graphe orienté
c. Graphe orienté
d. Circuit électrique
4. a. Vrai b. Faux c. Vrai d. Vrai
5. b

Travailler des compétences scientifiques

p. 135

7. Modéliser et résoudre un problème

$$I_{1\max} = 69,2 \text{ A; } I_{2\max} = 57,7 \text{ A; } I_3 = I_4 = 52,2 \text{ A.}$$

$$P = 0,3 \times I_1^2 - 41,8 \times I_1 + 2\,179,9.$$

P admet un minimum si $0,6 \times I_1 - 41,8 = 0$ donc si

$$I_1 = \frac{41,8}{0,6} \text{ soit } I_1 = 69,7 \text{ A.}$$

$$I_2 = 104,4 - 69,7 \text{ soit } I_2 = 34,7 \text{ A.}$$

$I_1 > I_{1\max}$ et $I_2 < I_{2\max}$ donc il n'est pas possible de minimiser la puissance perdue par effet Joule sur l'intervalle $[0; 69,2]$.

Appliquer

p. 136

8. Le transport d'électricité

On a de très hautes tensions dans le réseau de transport électrique.

9. L'effet Joule

1. L'effet Joule correspond au dégagement d'énergie thermique provoqué par le passage d'un courant dans un conducteur électrique.
2. $P_j = R \times I^2$. P_j est exprimé en joules (J), R en ohms (Ω) et I en ampères (A).
3. $P_j = 0,40 \times 26^2$ soit $P_j = 270$ W.

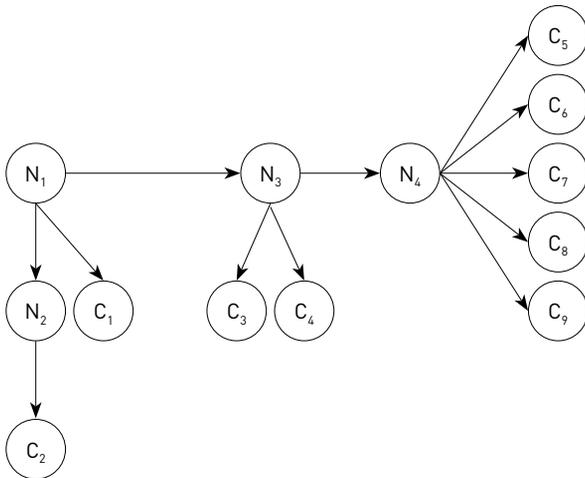
10. La modélisation d'un réseau électrique

1. Le réseau de transport est celui où on a des lignes THT (400 kV et 225 kV).

Le réseau de répartition est celui où on a des lignes de HT (90 kV et 63 kV) et MT (20 kV).

Le réseau de distribution est celui où on a des lignes de BT (400 V et 230 V).

2.



11. La puissance maximale des sources distributrices

1. a. $90 \text{ kV} = 9,0 \times 10^4 \text{ V}$
Si $I = 5\,000 \text{ A}$, comme $P = U \times I$ alors
 $P = 9,0 \times 10^4 \times 5\,000$ soit $P = 4,5 \times 10^8 \text{ W} = 450 \text{ MW}$.
Comme $450 \text{ MW} < P_{\text{max}}$, l'intensité du courant délivré par la source peut être égale à $5\,000 \text{ A}$.
Si $I = 6\,000 \text{ A}$, alors $P = 9,0 \times 10^4 \times 6\,000$
soit $P = 5,4 \times 10^8 \text{ W} = 540 \text{ MW}$.
Comme $540 \text{ MW} > P_{\text{max}}$, la source ne peut pas délivrer un courant d'intensité égale à $6\,000 \text{ A}$.
- b. $P = U \times I$. On peut exprimer P en mégawatts, I en ampères et U en mégavolts.
 $90 \text{ kV} = 90 \times 10^{-3} \text{ MV} = 0,090 \text{ MV}$.
Donc $f(x) = 0,090 \cdot x$.

c. $P_{\text{max}} = U \times I_{\text{max}}$ d'où $I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{U}$ donc $I_{\text{max}} = \frac{500 \times 10^6}{90 \times 10^3}$
soit $I_{\text{max}} = 5,5 \times 10^3 \text{ A}$.

2. a. Par lecture graphique, pour $I = 4\,000 \text{ A}$, on a :
 $P \approx 315 \text{ MW}$.

$315 \text{ MW} < P_{\text{max}}$, donc la source peut délivrer un courant d'intensité égale à $4\,000 \text{ A}$.

b. Par lecture graphique, pour $P_{\text{max}} = 400 \text{ MW}$, on a :
 $I_{\text{max}} = 5\,000 \text{ A}$.

c. $P_{\text{max}} = U \times I_{\text{max}}$ d'où $U = \frac{P_{\text{max}}}{I_{\text{max}}}$ donc $U = \frac{400 \times 10^6}{5\,000}$ soit
 $U = 8 \times 10^4 \text{ V}$.

La tension aux bornes de la source est donc de $80\,000 \text{ V}$ soit 80 kV .

Complément « pour les spécialistes » :

On sait que g est une fonction linéaire donc $g(x) = ax$ et on lit $g(5\,000) = 400$.
Donc $5\,000 \times a = 400$. Et $a = \frac{400}{5\,000} = 0,08$.
Donc $g(x) = 0,08 \cdot x$.

S'entraîner

p. 137-138

12. Danger pour les cigognes

Les cigognes avec leur envergure importante sont susceptibles de toucher simultanément deux lignes ou une ligne et un pylône. Alors le courant électrique traverse leur corps et elles peuvent être tuées.

13. Pertes sur les lignes du tramway

1. On calcule la résistance de la caténaire de longueur $d = 4,0 \text{ km}$ et de résistance linéaire $0,020 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$:
 $R_{\text{cat}} = 4,0 \times 0,020 = 0,080 \Omega$.
On applique la loi d'Ohm: $U_{\text{CA}} = R_{\text{cat}} \times I$ donc
 $U_{\text{CA}} = 0,080 \times 500$ soit $U_{\text{CA}} = 40 \text{ V}$.
On calcule la résistance des rails de longueur $d = 4,0 \text{ km}$ et de résistance linéaire $0,032 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$:
 $R_{\text{rail}} = 4,0 \times 0,032$ soit $R_{\text{rail}} = 0,13 \Omega$.
On applique la loi d'Ohm: $U_{\text{BD}} = R_{\text{rail}} \times I$ donc
 $U_{\text{BD}} = 0,13 \times 500$ soit $U_{\text{BD}} = 65 \text{ V}$.
2. La loi des mailles permet d'écrire :
 $U_{\text{CD}} - U_{\text{CA}} - U_{\text{AB}} - U_{\text{BD}} = 0$ donc $U_{\text{AB}} = U_{\text{CD}} - U_{\text{CA}} - U_{\text{BD}}$.

3. $U_{AB} = 750 - 40 - 65$ soit $U_{AB} = 645$ V.

La chute de tension U_{AB} représente la valeur dont la tension diminue lors du passage du courant dans la portion de circuit AB.

4. $P_a = U_{CD} \times I$ donc $P_a = 750 \times 500$ soit $P_a = 3,75 \times 10^5$ W.

$P_t = U_{AB} \times I$ donc $P_t = 645 \times 500$ soit $P_t = 3,23 \times 10^5$ W.

5. Pour réduire les pertes il faudrait que la résistance de la caténaire et des rails soit encore plus faible afin que la puissance transmise au tramway se rapproche de la puissance délivrée par l'alimentation.

14. L'alimentation d'une installation particulière

1. a. $R = R_L \times L$ donc $R = 0,40 \times 5,0$ soit $R = 2,0 \Omega$.

b. $P = U \times I$ d'où $I = \frac{P}{U}$.
 $I = \frac{9\,000}{230}$ soit $I = 39$ A.

c. $P_J = R \times I^2$ donc $P_J = 2,0 \times 39^2$ soit $P_J = 3,0 \times 10^3$ W.

d. $U_L = R \times I$ donc $U_L = 2,0 \times 39$ soit $U_L = 78$ V.

D'après la loi des mailles, on peut écrire :

$U_R = U - U_L$ donc $U_R = 230 - 78$ soit $U_R = 152$ V.

2. La tension n'est pas suffisante pour alimenter l'installation. Pour qu'elle soit effectivement alimentée en 230 V, il faudrait utiliser une ligne sous une tension plus élevée pour que les pertes soient compensées.

15. Monophasé ou triphasé ?

1. a. On calcule l'intensité du courant qui parcourt cette ligne: $P = U \times I$ d'où $I = \frac{P}{U}$.

$I = \frac{2,5 \times 10^6}{2,0 \times 10^4}$ soit $I = 125$ A.

$P_J = R \times I^2$ donc $P_J = 1,0 \times 125^2$ soit $P_J = 1,6 \times 10^4$ W.

La proportion de puissance perdue est donnée par le quotient $\frac{P_J}{P_e}$ soit $\frac{1,6 \times 10^4}{2,5 \times 10^6} \times 100 = 0,64$ %.

b. La proportion de puissance transmise est : $100 - 0,64$ soit $99,4$ %.

2. Pour chaque câble, $P'_e = \frac{P_e}{3}$ soit $P'_e = 0,83$ MW.

$I = \frac{P'_e}{U}$ donc $I = \frac{0,83 \times 10^6}{2,0 \times 10^4}$ soit $I = 41,5$ A.

$P'_J = R \times I^2$ donc $P'_J = 1,0 \times 41,5^2$ soit

$P'_J = 1,7 \times 10^3$ W.

Pour les 3 lignes : $P_J = 3 \times P'_J$ soit $P_J = 5,1 \times 10^3$ W.

La proportion de puissance perdue est :

$\frac{5,1 \times 10^3}{2,5 \times 10^6} \times 100$ soit $0,20$ %.

La proportion de puissance transmise est :

$100 - 0,20$ soit $99,8$ %.

Les pertes sont environ 3 fois plus faibles dans la ligne triphasée que dans la ligne monophasée.

3. En monophasé, la puissance transmise au bout de 20 km vaut :

$0,994 \times 0,994 \times 2,5 \times 10^6$ soit $2,47 \times 10^6$ W.

La puissance transmise au bout de 50 km vaut :

$0,994^5 \times 2,5 \times 10^6$ soit $2,43 \times 10^6$ W.

En triphasé, la puissance transmise au bout de 20 km vaut :

$0,998 \times 0,998 \times 2,5 \times 10^6$ W = $2,49 \times 10^6$ W.

La puissance transmise au bout de 50 km vaut :

$0,998^5 \times 2,5 \times 10^6$ W = $2,48 \times 10^6$ W.

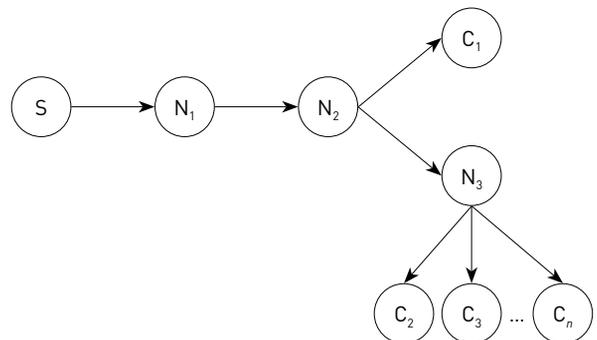
16. Réseau électrique et graphe orienté

1. La centrale est la source distributrice, l'entreprise et les habitations de la ville sont les cibles destinataires.

2. Le transformateur élévateur de tension est celui qui élève la tension de 15 kV à 63 kV. Les transformateurs abaisseurs de tension sont ceux qui abaissent la tension de 63 kV à 15 kV, puis de 15 kV à 400 et à 230 V.

Les transformateurs élévateur et abaisseur de tension sont nécessaires pour diminuer les pertes en lignes par effet Joule.

3.



17. Réseau électrique et pertes en lignes

1. Il s'agit de pertes thermiques sur les lignes, dues à l'effet Joule.

2. Pour le réseau RTE, l'énergie reçue est de 496 TWh. La somme des énergies transmises et des pertes est : $349 + 64 + 65 + 7 + 11$ soit 496 TWh.

Pour le réseau de distribution, la somme des énergies reçues est : $52 + 349$ soit 401 TWh.

La somme des énergies transmises et des pertes est : $203 + 173 + 25$ soit 401 TWh.

Dans les deux cas, les valeurs des énergies reçues par le réseau et celles transmises se compensent.

18. La minimisation des pertes par effet Joule

1. a. On écrit la loi des nœuds au nœud N_1 soit $I_1 + I_2 = I$ donc $I_2 = 50 - I_1$.

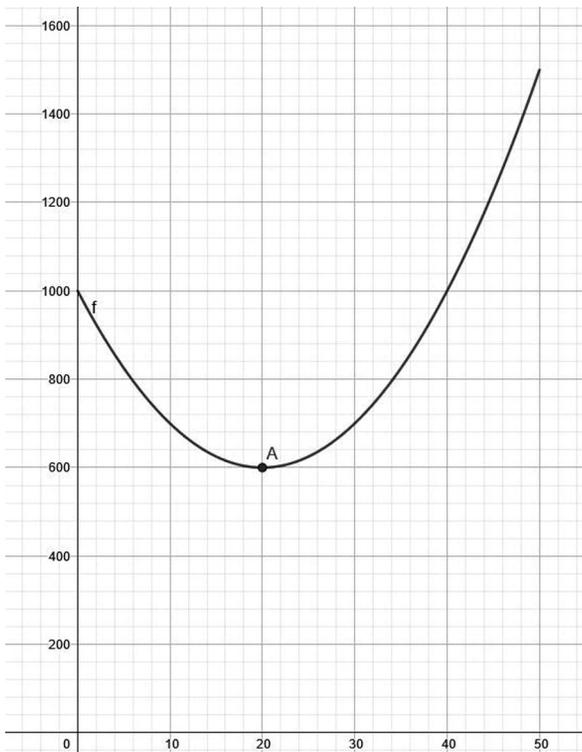
b. Seules les pertes par effet Joule entre S_1 et N et entre S_2 et N peuvent être minimisées. Elles sont telles que : $P = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$.

Étant donné que $I_2 = 50 - I_1$, on peut exprimer P en fonction de I_1 , ce qui donne :

$$P = f(I_1) = I_1^2 - 40 I_1 + 1\,000.$$

2. a. $f(50) = 50^2 - 40 \times 50 + 1\,000 = 1\,500$

x	0	20	50
Variations de f	1 000	600	1 500



b. La fonction f a pour minimum 600, il est atteint pour $x = 20$.

c. On peut utiliser GeoGebra.

$$f(x) = \text{Si}(0 \leq x \leq 50, x^2 - 40x + 1000)$$

$$\rightarrow x^2 - 40x + 1000, \quad ((0) \leq x \leq (50))$$

$$A = \text{Min}(f, 0, 50)$$

$$\rightarrow (20, 600)$$

— Voir le schéma à gauche en bas de page. —

3. a. La puissance perdue par effet Joule est : $P = f(I_1)$ donc $I_1 = 20$ A et $I_2 = 50 - I_1$ soit $I_2 = 30$ A.

b. La puissance minimale perdue par effet Joule vaut : $P_{\min} = 0,6 \times 20^2 + 0,4 \times 30^2$ soit $P_{\min} = 600$ W.

19. Fonction à minimiser

1. • En utilisant GeoGebra, le minimum vaut 274,3 et il est atteint pour $x = 17,1$.

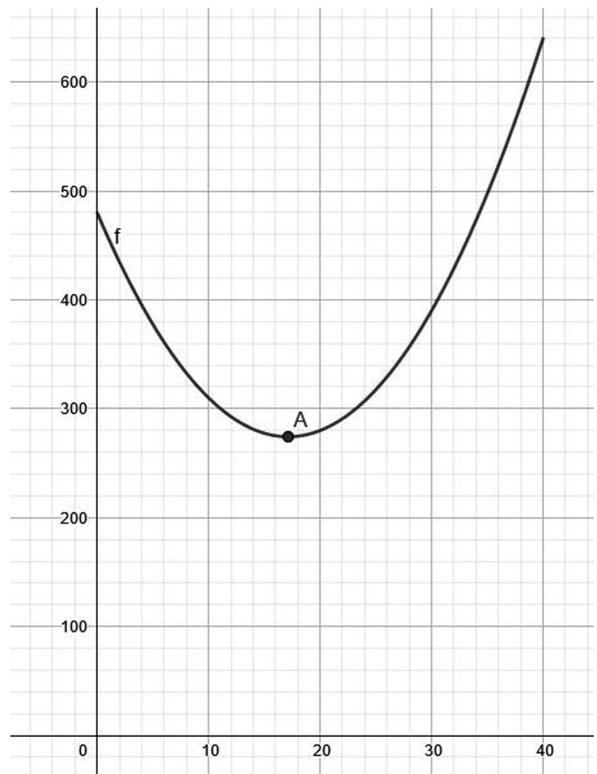
$$f(x) = \text{Si}(0 \leq x \leq 40, 0.7x^2 - 24x + 480)$$

$$\rightarrow 0.7x^2 - 24x + 480, \quad ((0) \leq x \leq (40))$$

$$A = \text{Min}(f, 0, 40)$$

$$\rightarrow (17.14, 274.29)$$

— Voir le schéma à droite en bas de page. —



- En utilisant la dérivée pour construire le tableau de variations de f sur $[0; 40]$:

$$f'(x) = 1,4x - 24$$

$$f'(x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{24}{1,4} \approx 17,1 \text{ et } f\left(\frac{24}{1,4}\right) \approx 274,3.$$

- 2. a.** • En utilisant GeoGebra, le minimum vaut 2 000 et il est atteint pour $x = 50$.

- En utilisant la dérivée pour construire le tableau de variations de f sur $[0; 100]$:

$$f'(x) = 1,6x - 80$$

$$f'(x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{80}{1,6} = 50 \text{ et } f(50) = 2\,000.$$

- b.** • En utilisant GeoGebra, le minimum vaut 67,5 et il est atteint pour $x = 22,5$.

- En utilisant la dérivée pour construire le tableau de variations de f sur $[0; 30]$:

$$f'(x) = 0,8x - 18$$

$$f'(x) = 0 \Leftrightarrow x = \frac{18}{0,8} = 22,5 \text{ et } f(22,5) = 67,5.$$

Vers le bac p. 139

20. Les lignes à très haute tension

1. a. $P = U \times I$

b. $I = \frac{P}{U}$ donc $I = \frac{500 \times 10^6}{400 \times 10^3}$ soit $I = 1,25 \times 10^3$ A.

c. $P_J = RI^2$

d. $P_{Al} = 0,95 \times (1,25 \times 10^3)^2$ soit $P_{Al} = 1,5 \times 10^6$ W.

La proportion de puissance perdue est donnée par le quotient : $\frac{P_{Al}}{P}$ donc $\frac{P_{Al}}{P} = \frac{1,5 \times 10^6}{500 \times 10^6} = 0,0030$ ou 0,30 %.

2. a. $I = \frac{P}{U}$ donc $I = \frac{500 \times 10^6}{90 \times 10^3}$ soit $I = 5,55 \times 10^3$ A.

$P_{HT} = RI^2$ donc $P_{HT} = 0,95 \times (5,55 \times 10^3)^2$ soit

$P_{HT} = 2,9 \times 10^7$ W.

La proportion de puissance perdue est donnée par

le quotient : $\frac{P_{HT}}{P}$ donc $\frac{P_{HT}}{P} = \frac{2,9 \times 10^7}{500 \times 10^6} = 0,058$ ou 5,8 %.

- b.** Les pertes sont environ 20 fois plus grandes dans la ligne HT que dans la ligne THT.

3. a. $I = \frac{P}{U}$ donc $I = \frac{500 \times 10^6}{400 \times 10^3}$ soit $I = 1,25 \times 10^3$ A. (comme en 1.b.).

$P_{acier} = RI^2$ donc $P_{acier} = 4,8 \times (1,25 \times 10^3)^2$ soit $P_{acier} = 7,5 \times 10^6$ W.

La proportion de puissance perdue est donnée par le quotient : $\frac{P_{acier}}{P}$ donc $\frac{P_{acier}}{P} = \frac{7,5 \times 10^6}{500 \times 10^6} = 0,015$ ou 1,5 %.

- b.** C'est la conductivité du métal qui explique la différence de pertes. En effet, l'acier est moins bon conducteur que l'aluminium, donc à géométrie égale sa résistance est plus grande et l'effet Joule est plus important.

- 4.** On voit qu'il y a moins de pertes lorsque la tension aux bornes de la ligne est plus grande, il vaut mieux utiliser une ligne THT qu'une ligne HT pour transporter l'électricité.

On voit aussi que meilleur est le conducteur (c'est-à-dire plus sa conductivité est grande) plus les pertes sont faibles. Il faut donc choisir un métal de grande conductivité. Mais le cuivre qui est le meilleur des conducteurs est aussi un métal beaucoup plus dense ce qui donnera des câbles électriques beaucoup plus lourds. Il vaut alors mieux utiliser l'aluminium qui conduit moins bien que le cuivre mais qui est beaucoup plus léger à géométrie identique.

Remarque : il faudrait aussi tenir compte de la capacité des métaux à s'allonger sous l'effet du dégagement de chaleur dû à l'effet Joule.

CHAPITRE 8 Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

Manuel p. 140-161

I. Introduction

Programme

Pour les sociétés, l'enjeu climatique et environnemental est celui d'une transition entre la situation actuelle et un développement fondé sur un régime durable de conversion et d'utilisation de l'énergie. La complexité de cette transition impose de connaître, comprendre et hiérarchiser les paramètres sur lesquels il est possible d'agir, individuellement et collectivement.

Savoirs	Savoir-faire
<ul style="list-style-type: none"> - 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. - Ces choix doivent tenir compte de nombreux critères et paramètres : disponibilité des ressources et adéquation aux besoins, impacts (climatique, écologique, sanitaire, agricole), vulnérabilités et gestion des risques, faisabilité, conséquences économiques et sociales. L'analyse de ces éléments de décision conduit le plus souvent à une recherche de diversification ou d'évolution des ressources (mix énergétique). - Les durées longues, liées à l'inertie de certains systèmes (infrastructures énergétiques, transports, production industrielle), sont à confronter à l'urgence de l'action. - La transition écologique des sociétés repose sur la créativité scientifique et technologique, comme sur l'invention de nouveaux comportements individuels et collectifs (consommations, déplacements, relations Nord-Sud). 	<p>Analyser d'un point de vue global les impacts de choix énergétiques majeurs : exemple du nucléaire.</p> <p>Dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Ce sous-thème est l'occasion de mettre en perspective l'ensemble des thématiques abordées dans les thèmes 1 et 2. La notion de risques naturels étudiée au collège et en classe de seconde (SVT) est mobilisée. À travers la diversité des exemples, les élèves comprennent l'unité du concept d'énergie.</p>	

Commentaires pédagogiques

Ce chapitre regroupe des thématiques déjà abordées dans les thèmes 1 et 2, à savoir une meilleure utilisation des énergies avec peu ou pas d'impact sur le réchauffement climatique. Les choix énergétiques dépendent des besoins, des ressources et de l'économie locale, ainsi que de la faisabilité des conversions mises en œuvre. La transition énergétique et écologique repose également sur l'inventivité technologique et de nouveaux comportements. La notion de risque traitée en SVT au cycle 4 et en seconde est réinvestie.

Ce chapitre comporte de nombreux exemples, dont les activités sont surtout des études documentaires. Les objectifs de formation « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » et « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement » y sont développés.

Le nucléaire, choix énergétique majeur, a pour avantage d'être propre en terme de CO₂, peu coûteux, délivrant des puissances considérables mais il présente néanmoins des risques avec les déchets radioactifs et d'éventuels accidents (activité 1).

L'activité 2 présente une métropole qui fait évoluer ses infrastructures avec un mix énergétique en valorisant les matières organiques issues des eaux usées, les déchets ménagers incinérés pour alimenter un turbogénérateur et le bois de la région pour alimenter un réseau de chaleur dans les quartiers nord de l'agglomération.

Des réserves énergétiques et une interconnexion du réseau électrique européen sont nécessaires en cas de panne ou de demande importante. Cependant, les systèmes ont une réactivité plus ou moins longue (activité 3).

Les activités qui suivent présentent des expérimentations technologiques avec :

- la production de dihydrogène pour alimenter les véhicules utilitaires et les bennes à ordures d'une agglomération (activité 4) ;
- la production d'électricité avec des piles microbiennes (activité 5) ;
- le captage du CO₂ dans des puits de carbone ou par transformation en roches (activité 6).

L'activité 7 montre les comportements individuels et collectifs à adopter pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Une seule des quatre dernières activités peut être traitée par le professeur suivant le profil des élèves.

Objectifs

- Faire l'analyse globale d'un choix énergétique majeur.
- Analyser des choix énergétiques locaux pour mettre en évidence la nécessité d'un mix énergétique.
- Savoir que l'inertie de certains systèmes peut augmenter leur temps de réaction.
- Savoir que la transition écologique repose sur la créativité scientifique et technologique, et sur de nouveaux comportements individuels et collectifs.

► Ouvrages de référence

- Société française de chimie, *L'hydrogène carburant de demain ?*, in L'actualité chimique (numéro 12, décembre 2001).

► Sites Internet

- Quelle place pour le nucléaire dans l'énergie mondiale ? :
<https://lejournal.cnrs.fr/articles/quelle-place-pour-le-nucleaire-dans-lenergie-mondiale>
- La transition énergétique pour la croissance verte :
<https://www.gouvernement.fr/action/la-transition-energetique-pour-la-croissance-verte>
- Sécurité d'approvisionnement énergétique :
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/securete-dapprovisionnement-energetique>
- Le captage et le stockage du CO₂ :
<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement/reduire-les-emissions-industrielles-co2-captage-et-stockage-du-co2>
- Les piles à combustible microbiennes : <http://cadarache.cea.fr/cad/Documents/Entreprises/Valorisation/Rencontres-CEA-Industrie/9eme/07-Nicolas-Chabert.pdf>
- Comment réduire son impact climat :
<https://www.quechoisir.org/enquete-cop-21-comment-reduire-son-impact-climat-n10845/>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ

p. 140

1. a
2. a et b
3. a et c
4. a

Activités

p. 142-151

Activité 1. Le choix du nucléaire

- **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement
- **Commentaires sur l'activité**

L'activité est centrée sur les impacts du nucléaire : l'énergie importante obtenue à partir de la fission

de noyaux lourds, son coût faible, peu de CO₂ émis, les ressources en uranium, les déchets radioactifs, les éventuels accidents et le projet ITER. À partir de toutes ces données, les élèves peuvent comprendre les critères à prendre en compte lors du choix du nucléaire. Cette activité peut être donnée en partie en classe inversée.

Remarque : dans une première édition du manuel, un chiffre trop élevé a été avancé concernant le nombre de cancers directement liés à l'accident de Fukushima. La surveillance épidémiologique des cas de cancers de la thyroïde ne permet pas actuellement d'établir un lien entre ces cancers et l'accident de Fukushima. Ces données ont donc été changées lors de la réimpression.

• Corrigés du guide de travail

1. La puissance d'un réacteur nucléaire est :

$P = 1\,000\text{ MW}$. Si l'on considère qu'il fonctionne durant une année en continu, l'énergie fournie sera : $E = 1\,000 \times 365 \times 24$ soit
 $E = 8,8 \times 10^6\text{ MWh} = 8,8\text{ TWh}$.

Pour obtenir la même énergie, il faudrait :

$m_c = 260 \times 365 \times 24$ soit $m_c = 2,3 \times 10^6$ tonnes de charbon.

$m_f = 170 \times 365 \times 24$ soit $m_f = 1,5 \times 10^6$ tonnes.

Pour fournir une quantité d'énergie considérable égale à 8,8 TWh, 27 tonnes d'uranium enrichi sont nécessaires dans une centrale nucléaire, alors qu'il faut $2,3 \times 10^6$ tonnes de charbon ou $1,5 \times 10^6$ tonnes de fioul dans une centrale thermique soit environ 10^5 fois plus.

2. a. D'après le doc 2, un réacteur d'une puissance de 900 MW produit l'énergie électrique nécessaire à la consommation de 400 000 foyers.

L'électricité en France est produite en majeure partie par l'énergie nucléaire (environ les $\frac{3}{4}$), ce qui n'est pas le cas dans les autres pays européens et qui explique son faible coût.

L'énergie nucléaire est une énergie propre en termes de CO₂ émis car, avec l'énergie d'origine hydraulique, ce sont les deux méthodes d'obtention d'énergie électrique qui émettent le moins de CO₂ par kWh produit ($6\text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$).

b. D'après le doc 2, la filière industrielle nucléaire rassemble 2 500 entreprises et emploie près de 220 000 salariés (emplois directs et indirects). Une sortie rapide du nucléaire de la France entraînerait une crise sociale avec des licenciements et également une crise énergétique.

3. a. En considérant que la demande mondiale en uranium s'élève à 65 000 tonnes par an et que les ressources connues en uranium s'élèvent à 4,7 millions de tonnes, la durée probable d'exploitation des ressources en uranium est $\Delta t = \frac{4,7 \times 10^6}{65\,000}$ soit $\Delta t = 72$ ans.

La durée Δt dépend de la demande mondiale annuelle et des ressources en uranium. La demande mondiale en uranium va augmenter car les pays émergents devraient investir massivement dans le nucléaire. Quant aux réserves en uranium, la valeur donnée est celle des réserves connues.

b. Les déchets générés par l'industrie électronucléaire sont radioactifs, c'est-à-dire que les noyaux atomiques se désintègrent en émettant des rayonnements ; ceux-ci sont très énergétiques. On appelle demi-vie la durée nécessaire à la moitié des noyaux radioactifs initiaux à se désintégrer. Plus la demi-vie d'un déchet radioactif est importante et plus son activité est haute, plus ce déchet reste dangereux sur un long terme.

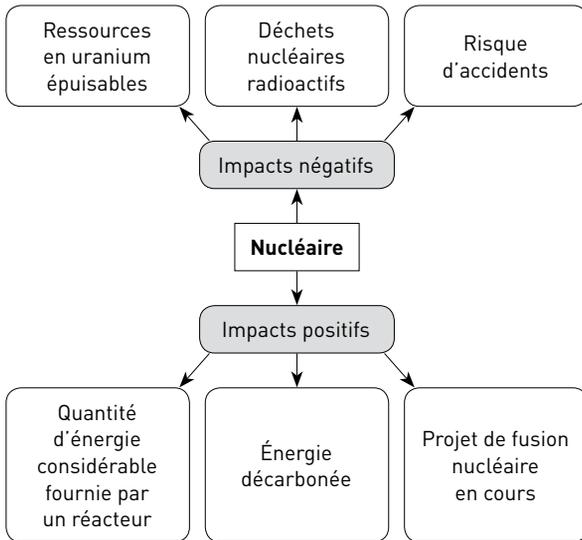
4. L'accident de Tchernobyl est dû à une réaction non contrôlée, avec des rejets radioactifs continus pendant une dizaine de jours. L'accident de Fukushima a pour origine le tremblement de terre et le tsunami qui ont précédé la défaillance des circuits électriques, avec des rejets radioactifs discontinus durant une quinzaine de jours.

L'accident de Tchernobyl est un événement à incidence continentale, avec une contamination sur des surfaces importantes ainsi qu'un très grand nombre de victimes. Celui de Fukushima est un événement à incidence régionale, avec une contamination sur quelques centaines de km² et peu de victimes dont le décès serait lié à l'irradiation. Le contrôle de la contamination des denrées et la restriction de leur commercialisation a été immédiat à Fukushima, ce qui n'a pas été le cas à Tchernobyl.

5. Le projet ITER a pour intérêts d'être une source d'énergie considérable et décarbonée, sans risque d'accident, avec des « combustibles » qui ne produisent que peu de déchets radioactifs dont la durée de vie est courte. Un tel projet représente un engagement important dans la durée. Si ce projet aboutit, il faudra plusieurs décennies pour que les populations puissent bénéficier de l'énergie obtenue de la fusion des noyaux. Mis en place depuis 1985, le projet ITER doit nécessiter des moyens

financiers considérables de la part des pays impliqués.

Synthèse



Activité 2. La transition énergétique à l'échelle locale

- **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• Commentaires sur l'activité

L'activité montre comment une métropole, à partir du potentiel de la région dans laquelle elle se trouve, peut développer un mix énergétique (digesteur installé dans une station d'épuration, incinérateur et chaufferie bois). L'activité peut être donnée en équipes où chaque binôme ou élève étudie un type d'infrastructure.

• Corrigés du guide de travail

1. Les équipements de la station d'épuration, comme les pompes par exemple, ont besoin d'énergie pour fonctionner. L'installation du digesteur permettra de produire du biogaz, qui en brûlant libèrera l'énergie nécessaire à l'installation, qui ne sera plus apportée par le réseau extérieur.

2. $P = \frac{E}{\Delta t}$ avec P en MW, E en MWh et Δt en h. Donc $P = \frac{10^5}{365 \times 24}$ soit P = 11 MW. On a considéré dans le calcul que l'incinérateur fonctionnait 365 jours par an et 24 heures sur 24. Sa puissance est en fait supérieure à 11 MW.

La puissance de l'incinérateur est environ 4 fois supérieure à celle d'une éolienne.

3. a. Les chaudières classiques utilisent du gaz de ville principalement constitué de méthane ou du fioul pour fonctionner. Le méthane et le fioul sont des ressources non renouvelables et qui libèrent du dioxyde de carbone lors de leur combustion. Dans le cas d'une chaudière au bois, on utilise une ressource renouvelable, le bois, et le CO₂ émis est compensé par celui absorbé par la photosynthèse lors la croissance des arbres. Ceux-ci sont alors replantés pour assurer le caractère renouvelable.

b. Ce dispositif ne peut être déployé que pour des zones d'habitation assez denses. Pour des zones moins peuplées, le réseau de canalisations serait trop étendu, générant trop de pertes thermiques. Si le bois n'est pas produit localement, il faudra dépenser de l'énergie pour son transport, ce qui rend son utilisation moins pertinente du point de vue environnemental.

4. D'après le doc 1, la région comporte des forêts, qui peuvent fournir le bois nécessaire au fonctionnement de la chaufferie du réseau de chaleur. De plus, la station d'épuration et le pôle de valorisation des déchets produisent des matières fertilisantes (digestat et compost) qui peuvent être utilisées localement pour l'agriculture.

Synthèse

L'agglomération clermontoise va dans le sens de la transition énergétique et écologique avec ces trois infrastructures :

- l'énergie produite habituellement sera diminuée par celles produites par le digesteur de la station d'épuration et l'incinérateur ;
- moins de CO₂ sera produit dans l'atmosphère avec la photosynthèse qui compense la combustion du bois.

Activité 3. La gestion de l'équilibre du réseau électrique

- **Objectif :** Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• Commentaires sur l'activité

L'activité permet de montrer aux élèves que l'énergie produite doit être adaptée à l'énergie demandée, sinon la fréquence du réseau peut varier, avec des conséquences non négligeables. Des réserves d'énergie et l'interconnexion entre différents pays

permettent de pallier le manque d'énergie qui peut exister parfois.

Cette activité simple et rapide peut être donnée en tâche complexe (voir variante pédagogique).

• Corrigés du guide de travail

1. a. Les appareils électroménagers sont prévus pour fonctionner à une fréquence donnée, notamment ceux comprenant un moteur électrique. Un écart de la fréquence du réseau peut entraîner des dysfonctionnements.

Remarque : cela peut également entraîner un décalage entre l'heure officielle et celle affichée sur les écrans des appareils électroménagers.

b. Contrairement aux centrales hydrauliques ou nucléaires, les installations solaires et éoliennes produisent de l'électricité par intermittence. La nuit ou lorsque le vent est insuffisant, ces centrales ne sont pas productives et la production globale peut alors devenir inférieure à la demande : la fréquence du réseau diminue.

Remarque : à partir de 49 Hz, un plan de délestage automatique est activé car si la fréquence du réseau chute de façon trop importante, les centrales décrochent les unes après les autres jusqu'au blackout, c'est-à-dire à l'effondrement complet du réseau.

2. a. Lors d'un grand froid soudain, les systèmes de chauffage, notamment électriques, sont mis en marche. La demande en énergie devient alors supérieure à l'offre et la fréquence du réseau diminue momentanément.

b. Sur le doc 1, on observe une chute brutale de la fréquence du réseau à 11 h 14 ; l'inertie des alternateurs ne suffit plus à stabiliser la fréquence. La réserve primaire est activée au bout de 30 s, ce qui permet dans un premier temps de stabiliser la fréquence du réseau puis la faire croître jusqu'à revenir à sa valeur initiale à 11 h 21, soit 7 minutes après la chute brutale.

Synthèse

La réserve primaire est activée en 30 secondes seulement, mais n'a qu'une puissance de 600 MW (équivalente à 2/3 de la puissance d'une tranche nucléaire classique).

Un délai plus long, de 15 minutes, permet de quadrupler cette puissance en activant les réserves secondaire et tertiaire rapide. Si besoin, une réserve complémentaire de 500 MW peut encore

être activée, 30 minutes après la baisse de fréquence du réseau.

L'interconnexion du réseau, à l'intérieur d'un pays mais aussi avec les pays voisins, est primordiale car elle peut grandement limiter les baisses de la fréquence du réseau : en effet, pour une vague de grand froid, par exemple, qui sévit localement, les pays voisins peuvent fournir un surplus de puissance nécessaire à la stabilisation du réseau du pays subissant la vague de froid.

Activité 4. Le dihydrogène

• **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

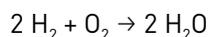
• Commentaires sur l'activité

Cette activité permet aux élèves de considérer les avantages et les inconvénients du dihydrogène en tant que carburant. L'activité peut être donnée en TP pour les enseignants qui auraient les élèves en groupes (voir variante pédagogique).

• Corrigés du guide de travail

1. L'énergie thermique peut vaporiser de l'eau ; celle-ci envoyée sur une turbine la mettrait en rotation et entraînerait un alternateur. L'énergie électrique ainsi obtenue permettrait de réaliser l'électrolyse de l'eau.

2. Le fonctionnement de la pile à hydrogène est modélisé par la réaction d'équation :



3. L'usine de Dijon fonctionne suivant ces différentes étapes :

- incinération des déchets collectés qui produisent de l'énergie thermique ;
- transformation de l'énergie thermique en énergie électrique ;
- obtention de dihydrogène par électrolyse de l'eau ;
- stockage du dihydrogène.

Il y a réduction des émissions de CO_2 , car lors de la combustion du dihydrogène, le seul produit formé est de l'eau, contrairement aux combustibles fossiles.

Synthèse

Le projet de construction de l'usine de Dijon présente des avantages : l'énergie est fournie par les déchets, il n'y a pas de CO_2 émis lors de la combus-

tion du dihydrogène, la recharge des véhicules se fait rapidement. Les inconvénients sont les suivants : peu de véhicules qui bénéficient du carburant dihydrogène et le projet est dispendieux.

Activité 5. Les piles microbiennes

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

L'activité concerne les piles à combustible microbiennes : comparaison de piles microbiennes à combustible en station d'épuration et piles microbiennes à plantes, leurs avantages et leurs inconvénients.

L'activité peut être donnée en équipes où chaque élève ou binôme étudie un type de pile.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Une pile est un dispositif qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique par oxydoréduction.

Les bactéries réalisent l'oxydation des composés organiques qui libère des électrons. Les bactéries peuvent donc être utilisées dans un système de type pile.

2. La pile est de très grande taille et le rendement est encore très faible.

3. Le 0:00 marque minuit. On observe que les nuits, la tension est nulle alors qu'en journée, la tension n'est pas nulle (entre 0,15 et 0,25 V). La photosynthèse nécessite de la lumière et ce sont les composés en excès de la photosynthèse qui permettent le fonctionnement de la pile. Les oscillations sont donc liées à la photosynthèse qui n'a lieu que le jour. Cela permet de confirmer que la pile fonctionne bien grâce aux plantes.

4. Les composés organiques fournis par les eaux usées ou par les plantes sont renouvelés soit par apport de nouvelles eaux usées soit par photosynthèse : ce sont des énergies renouvelables. Le principe est identique mais les bactéries utilisent les composés organiques fournis par les plantes au lieu d'utiliser ceux du milieu.

5. Ce sont des énergies renouvelables ; ces piles sont couplées à des activités humaines importantes : traiter les eaux usées ou produire de la nourriture.

Synthèse

Les êtres vivants réalisent de nombreuses transformations biochimiques constituant le métabo-

lisme. Ils réalisent notamment des réactions d'oxydation à partir de composés organiques prélevés dans le milieu, ce qui libère des électrons : ils peuvent donc être intégrés dans des systèmes énergétiques de type pile. Ces composés organiques sont fournis soit par des boues d'épuration soit par des plantes cultivées dans des champs. Ces piles microbiennes sont donc des systèmes énergétiques innovants.

Les avantages de ces piles sont que ce sont des énergies renouvelables et qu'elles sont associées à d'autres activités humaines. Mais pour l'instant, le rendement est faible et leur dispositif peut être très encombrant

Activité 6. Le captage du CO₂

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

L'activité concerne deux projets de captage de CO₂ : les colonnes à microalgues et sa transformation en roches. Cette activité, qui ne présente pas de difficulté majeure, peut être donnée en tâche complexe (voir variante pédagogique).

- **Corrigés du guide de travail**

1. La photosynthèse est la transformation mise en œuvre dans une colonne à microalgues.

1. Colonne à microalgues
2. Réseau d'assainissement
3. Digesteur
4. Réseau de gaz de ville

Le gaz de ville est un combustible donc il produit du CO₂ en brûlant dans une chaudière ou lors de la cuisson d'aliments. Le CO₂ peut être ensuite capté, et le cycle recommence. C'est la raison pour laquelle on parle d'économie circulaire dans ce type d'expérimentation.

3. 25 t d'eau désalinisée sont nécessaires pour injecter 1 t de CO₂. Il faut donc :

$$m_1 = 66\,000 \times 25 \text{ soit } m_1 = 1\,700\,000 \text{ t d'eau.}$$

$$m_2 = 10\,000 \times 25 \text{ soit } m_2 = 250\,000 \text{ t d'eau.}$$

Les quantités d'eau nécessaires sont considérables.

Synthèse

Les microalgues dans les colonnes réalisent la photosynthèse à partir de l'eau contenue dans les

colonnes et du CO₂ capté. Ces colonnes peuvent capter l'équivalent de 40 arbres en CO₂. À Fos-Sur-Mer, les puits de carbone nécessitent une infrastructure plus importante pour capter les fumées des usines.

Le projet Carbfix est de taille gigantesque puisque 10 000 tonnes de CO₂ pourraient être captées par an. Le CO₂ dissous dans l'eau est injecté dans des roches basaltiques pour former des roches calcaires.

Dans les deux cas, ce sont des projets coûteux mais qui ont l'avantage de capter du CO₂ à plus ou moins grande échelle.

Activité 7. Les comportements individuels et collectifs

• **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

• **Commentaires sur l'activité**

Cette activité consiste à étudier les différents comportements individuels et collectifs à tenir désormais afin de réduire les émissions de CO₂. L'activité étant simple, elle peut être donnée en tâche complexe (voir variante pédagogique).

• **Corrigés du guide de travail**

1. La plupart des pays peu consommateurs d'énergie sont situés dans l'hémisphère Sud et sont des pays émergents. L'accès à l'énergie doit donc leur être facilité.

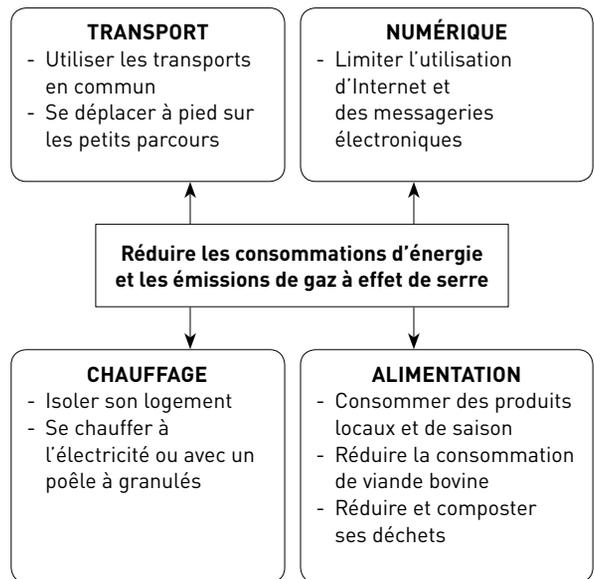
2. Si on suppose qu'ils utilisaient chacun leur voiture pour aller travailler avant de changer pour prendre les transports en commun, les émissions de CO₂ sont réduites par an de $2 \times (1\,043 - 196)$ soit 1 694 kg ou 1,7 tonne de CO₂.

Si on suppose qu'ils utilisaient la même voiture pour aller travailler, les émissions de CO₂ sont réduites par an de $1\,043 - 196$ soit 847 kg de CO₂.

En utilisant un poêle à granulés au lieu d'un chauffage au fioul, les émissions de CO₂ sont réduites par an de $4,50 - 0,63$ soit 3,87 t de CO₂.

3. En consommant des produits locaux et de saison, les transports et leur conservation sont minimisés donc moins d'énergie est nécessaire et moins de CO₂ est émis.

Synthèse



Se tester

p. 154

- a. Faux b. Vrai c. Faux d. Faux
- a. Vrai b. Vrai c. Faux d. Vrai
- a. Faux b. Vrai c. Faux d. Vrai
- a. Vrai b. Faux c. Faux d. Vrai
- a et d

Travailler des compétences scientifiques

p. 155

7. Argumenter à partir d'informations

1. L'énergie produite par le data center en une année est donnée par la relation : $E = P \times \Delta t$ avec E en kWh, P en kW et Δt en h. En prenant pour P la valeur moyenne de 60 kW, on a :

$$E = 60 \times 365 \times 24 \text{ soit } E = 5,3 \times 10^5 \text{ kWh.}$$

2. a. Sachant qu'un kWh produit génère une émission de 89 g de CO₂, la masse de CO₂ m non rejeté dans l'atmosphère vaut :

$$m = 5,3 \times 10^5 \times 89 \text{ soit } m = 4,7 \times 10^7 \text{ g ou } 47 \text{ t.}$$

b. La valeur de la masse donnée dans le doc est de 45 t. L'information donnée dans le document est donc correcte.

3. Cette initiative a pour avantages de diminuer l'énergie à produire pour chauffer la piscine et donc réduire les émissions de CO₂. Cependant, très

probablement, ce projet a dû prendre beaucoup de place et être coûteux.

Appliquer

p. 156

8. Appareils en veille et empreinte carbone

1. Voici quelques appareils qui peuvent rester en veille durant la journée entière : une télévision, un lecteur DVD, une console de jeu vidéo, une imprimante, etc.

2. $E = P \times \Delta t$ donc $P = 50 \times 24$ soit $P = 1\,200$ Wh ou $P = 1,2$ kWh.

3. L'énergie totale est : $E_t = E \times N_{\text{logement}}$ donc $E_t = 1,2 \times 30 \times 10^6$ soit $E_t = 3,6 \times 10^7$ kWh.

4. La masse de dioxyde de carbone est :

$m_t = 3,6 \times 10^7 \times 89 = 3,2 \times 10^9$ g soit $3,2 \times 10^3$ tonnes. Chaque jour, environ 3 200 tonnes de CO_2 sont produites en France à cause des veilles électriques.

5. On pourrait, par exemple, utiliser des multiprises avec un interrupteur pour éteindre tous les appareils électroniques.

9. Un puits canadien

1. Un puits canadien consiste à faire passer, avant qu'il ne pénètre dans la maison, une partie de l'air neuf de renouvellement par des tuyaux enterrés dans le sol à une profondeur de 2 mètres. En hiver, le sol à cette profondeur est plus chaud que dehors : l'air froid est alors préchauffé. En été, l'air qui passe dans les tuyaux enterrés est rafraîchi avant d'arriver dans la maison.

2. Par an, l'énergie consommée par unité de surface est : $E = \frac{4\,500}{105}$ soit $E = 42,9$ kWh \cdot m⁻² \cdot an⁻¹.

La valeur de E est inférieure à 50 kWh \cdot m⁻² \cdot an⁻¹ ; ce modèle de maison satisfait donc bien à la norme RT2012.

3. La valeur de l'énergie économisée est donnée par la relation : $E_{\text{économisée}} = P \times \Delta t$ donc

$E_{\text{économisée}} = 15 \times 50$ soit $E_{\text{économisée}} = 750$ kWh.

L'énergie consommée vaut : $E_{\text{cons}} = 4\,500 - 750$ soit $E = 3\,750$ kWh.

4. Après l'installation du puits canadien, la puissance consommée par unité de surface et par an est égale à :

$P' = \frac{3\,750}{105}$ soit $P' = 35,7$ kWh \cdot m⁻² \cdot an⁻¹.

$P' > 12$ kWh \cdot m⁻² \cdot an⁻¹. La norme RT2020 ne sera pas satisfaite.

Comme solutions, on pourrait installer des panneaux solaires, utiliser un autre moyen de chauffer la maison, l'isoler davantage, etc.

10. Engrais et coût énergétique de production

Un des enjeux de la transition énergétique des sociétés est de limiter la consommation d'énergie.

Les engrais augmentent les rendements agricoles, ce qui permet de nourrir les populations (autre enjeu sociétal) mais leur production et leur transport consomment de l'énergie.

Trois types d'engrais ont été testés. L'utilisation d'engrais organique consomme moins d'énergie (350 MJ \cdot t⁻¹ de tomates) qu'un engrais chimique, tout en permettant d'obtenir des tomates de tailles et de masses identiques. Le choix d'utiliser un engrais organique plutôt qu'un engrais chimique participe donc bien à la transition énergétique des sociétés.

S'entraîner

p. 157-159

11. La valorisation des plastiques

1. Les trois voies de valorisation des plastiques sont le recyclage mécanique, la valorisation chimique et la valorisation énergétique.

2. La dépolymérisation d'un polymère usagé est la transformation chimique du polymère en monomère, c'est-à-dire en produit de base. Le monomère peut ensuite être de nouveau polymérisé. Le produit de base est ainsi réutilisé, ce qui permet de réduire les quantités de ce produit à transformer.

3. a. Certains plastiques facilitent la combustion des déchets auxquels ils sont mélangés car ils possèdent une grande énergie massique. Le gaz naturel est notamment utilisé dans les chaudières domestiques ou collectives pour le chauffage. Le gaz naturel possède une énergie massique de 38 MJ \cdot kg⁻¹, alors que le PE, le PS et le PET ont une énergie massique de l'ordre de 45 MJ \cdot kg⁻¹ donc supérieure.

b. En mélangeant ces plastiques aux déchets, leur combustion libérant beaucoup d'énergie, moins d'énergie sera nécessaire pour incinérer les autres

déchets. Ils se substituent aux combustibles fossiles.

4. Le recyclage mécanique est le moins énergétique et émet le moins de CO₂ car il n'y a pas de transformation chimique. Le matériau est conservé mais mis sous une autre forme. Il est simplement broyé, lavé, etc.

La dépolymérisation d'un polymère est une transformation chimique qui nécessite plus d'énergie que le recyclage mécanique. Il en est de même pour les émissions de CO₂.

L'incinération en usine avec production de vapeur et d'électricité est l'opération qui demande le plus d'énergie et qui émet le plus de CO₂. En effet, les déchets sont pour la plupart organiques ; ils contiennent donc du carbone et leur combustion produit du CO₂.

12. Le dihydrogène, « carburant » de l'avenir ?

1. Le procédé de production de dihydrogène le plus intéressant pour l'environnement est celui qui émet le moins de CO₂. L'électrolyse de l'eau ne produit pas de CO₂.

2. Pour une mole de dihydrogène formé par reformage à l'eau, on doit consommer une énergie de $\frac{244}{4}$ soit 61 kJ. Pour une mole de dihydrogène formé par électrolyse de l'eau, on doit consommer une énergie de $\frac{564}{2}$ soit 282 kJ. L'obtention de dihydrogène par reformage à l'eau nécessite donc moins d'énergie que son obtention par électrolyse de l'eau.

3. a. Une même quantité de dihydrogène stocké occupe un volume plus important lorsqu'il est comprimé que lorsqu'il est liquéfié. Le dihydrogène comprimé nécessite des réservoirs résistants ; des pertes importantes par évaporation ont lieu pour le dihydrogène liquéfié. Les deux modes de stockage sont coûteux.

b. L'électrolyse de l'eau ne génère pas de CO₂ mais est gourmande en énergie. Obtenir du dihydrogène *in situ* permettrait de réduire les dépenses en énergie (pas de transport et pas de stockage).

3. Les avantages et les inconvénients du dihydrogène sont donnés dans le tableau suivant.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Production par électrolyse de l'eau qui ne libère pas de CO₂. - Combustion très énergétique qui ne produit que de l'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gaz inflammable. - Production par électrolyse de l'eau très énergétique ; production par reformage à l'eau qui émet du CO₂. - Problèmes de transport et de stockage.

Le dihydrogène peut avoir un avenir en tant que carburant car sa combustion n'émet pas de CO₂ et libère une quantité d'énergie importante. Cependant, il serait nécessaire que les recherches de son obtention par électrolyse de l'eau *in situ* aboutissent, car cela éliminerait les problèmes liés à son transport et à son stockage. La consommation en énergie pour sa production serait également réduite.

13. Réacteur EPR et éolienne

1. a. L'énergie E_{EPR} est donnée par la relation :
 $E_{EPR} = \text{facteur de charge} \times P_{EPR} \times \Delta t$.

Donc $E_{EPR} = 0,75 \times 1\,600 \times 365 \times 24$ soit
 $E_{EPR} = 1,1 \times 10^7$ MWh.

b. L'énergie E_e est donnée par la relation :

$E_e = \text{facteur de charge} \times P_e \times \Delta t$.

Donc $E_e = 0,20 \times 3,0 \times 365 \times 24$ soit
 $E_e = 5,3 \times 10^3$ MWh.

2. Les avantages et les inconvénients des deux modes de production d'électricité sont donnés dans le tableau suivant.

Réacteur EPR	Éolienne
Avantages	
<ul style="list-style-type: none"> - Très grande puissance : 1,6 GW. - Production quasi-continue (facteur de puissance de 75 %). - En conséquence : énergie produite considérable, équivalente à celle produite par : $\frac{1,1 \times 10^7}{5,3 \times 10^3} \approx 2\,000$ éoliennes ! - Énergie peu chère et peu de CO₂ émis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une fois l'éolienne installée, la production d'énergie est « verte », et sans émission de CO₂.

Inconvénients	
<ul style="list-style-type: none"> - Ressources en uranium limitées. - Accidents possibles néfastes à l'être humain et à l'environnement. - Déchets radioactifs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance 500 fois inférieure à celle d'un réacteur nucléaire. - Production intermittente (facteur de puissance de 20 %). - Extraction difficile et coûteuse des terres rares. Quantités importantes de matières premières nécessaires à sa fabrication. - Impact sur le paysage, sur la propagation des ondes. - Bruit généré qui serait néfaste à l'être humain. - Oiseaux et chauve-souris tués par les pales en rotation.

14. Cancers de la thyroïde et pastilles d'iode

1. Lors de l'accident nucléaire de Tchernobyl, de l'iode radioactif a été libéré dans l'atmosphère et a contaminé des aliments ingérés ensuite par les populations. Cet iode, majoritairement fixé par la thyroïde, est 500 à 8 000 fois plus présent dans la thyroïde que dans les autres organes (doc 3). En effet, la thyroïde est une glande qui fabrique des hormones à partir d'iode (doc 1).

Donc, après ingestion d'aliments tels que le lait et les légumes, l'iode radioactif contenu dans ces aliments s'est fixé sur la thyroïde, ce qui a provoqué l'apparition de cancers.

2. Le doc 2 montre l'effet de l'ingestion de pastille d'iode non radioactif sur la fixation d'iode radioactif par la thyroïde.

Le temps 0 h signifie que l'ingestion de pastilles s'est faite à l'instant d'exposition à l'iode radioactif. On constate que l'énergie absorbée est très faible ($12 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). On peut conclure que l'iode radioactif n'a donc été que peu fixé par la thyroïde. Il y a en fait une compétition entre l'iode radioactif et l'iode non radioactif au niveau de la thyroïde (doc 1); l'iode non radioactif est fixé à la place de l'iode radioactif.

Donc, d'après la réponse à la question 1, si l'iode radioactif n'est pas fixé, alors le risque de cancer de la thyroïde est limité.

3. Le doc 2 montre que si la pastille d'iode non radioactif est prise trop tôt ou trop tard, alors son effet est nettement moins important que si elle est

prise à l'instant de l'exposition (96 h avant l'exposition, énergie absorbée de $375 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 24 h après l'exposition, énergie absorbée de $367 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; à l'instant de l'exposition, énergie absorbée de $12 \text{ mJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ soit environ 30 fois moins). Donc, pour qu'elle soit efficace, la pastille doit être prise à l'instant indiqué par les pouvoirs publics.

De plus, si la contamination persiste sur plusieurs jours, il faut reprendre des pastilles car leur effet est très limité dans le temps.

15. Denrées et radioactivité

En moins d'un mois après l'accident de Fukushima, la contamination en iode des épinards est repassée en dessous de la norme de commercialisation et en un mois et demi pour la contamination en césium. Les denrées ont été contaminées pendant une durée beaucoup plus longue après l'accident de Tchernobyl.

On peut expliquer cette différence par les facteurs suivants :

- L'accident de Fukushima a eu lieu en hiver (mars) où la végétation est peu développée ; en revanche l'accident de Tchernobyl a eu lieu au printemps (avril) où la végétation est déjà très développée, ce qui explique que les légumes à feuilles ont été fortement contaminés.
- La situation de la centrale de Fukushima en bord de mer a entraîné une contamination marine, mais les courants ont permis de diminuer la radioactivité rapidement en un endroit.

Vers le bac

p. 160-161

16. Les lampes à LED

1. a. Le lumen est l'unité associée au flux lumineux, le watt est l'unité de base de puissance.

b. L'efficacité en lumen par watt ne rend pas compte d'un rendement énergétique. Par définition, c'est le quotient de la puissance lumineuse perçue par l'œil humain et de la puissance de la lampe. L'efficacité traduit l'intensité lumineuse perçue par l'œil humain.

2. Pour la lampe à incandescence, l'efficacité vaut $\frac{580}{60}$ soit 9,7 lm/W. D'après le doc 1, elle doit comporter la lettre F sur son étiquette. L'étiquette énergie de la lampe est correcte.

Remarque : sur la première impression du manuel, l'étiquette énergie de la lampe à incandescence était « E ». Cela a été corrigé dans les réimpressions pour indiquer « F ».

Pour la lampe à LED, l'efficacité vaut $\frac{806}{8}$ soit 100 lm/W. D'après le doc 1, elle doit comporter au moins la lettre A sur son étiquette. L'étiquette énergie avec A+ est donc correcte.

On a vérifié que les lampes à incandescence ont une efficacité moins grande que les lampes à LED.

3. L'énergie est donnée par la relation :

$E = P \times \Delta t$. On réalise une économie d'énergie de : $E = (60 - 8) \times 2 \times 365$ soit $E = 3,8 \times 10^4$ Wh ou environ 40 kWh.

4. Les lampes à LED ont une puissance plus faible que les lampes à incandescence donc consomment moins d'énergie. Elles ont une efficacité lumineuse plus grande, une durée de vie plus longue (environ 10 fois) mais un coût un peu plus important. La grande consommation d'énergie des lampes à incandescence justifie l'interdiction de leur fabrication.

17. Engrais azotés et émissions de gaz à effet de serre

1. Les gaz à effet de serre cités sont le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote.

2. Le total des émissions de gaz à effet de serre émis par hectare cultivé vaut :

$336 + 31 + 1\,351 + 1\,658 + 6 + 47$ soit $3\,429$ kg CO₂-eq · ha⁻¹.

Les pourcentages par poste sont respectivement :

Consommation de carburant : $\frac{336 \times 100}{3\,429}$ soit 9,8 %.

Mécanisation : $\frac{31 \times 100}{3\,429}$ soit 0,9 %.

Fertilisation : $\frac{1\,351 \times 100}{3\,429}$ soit 39,4 %.

Émissions de NO₂ : $\frac{1\,658 \times 100}{3\,429}$ soit 48,4 %.

Produits phytosanitaires : $\frac{6 \times 100}{3\,429}$ soit 0,2 %.

Fabrication des semences : $\frac{47 \times 100}{3\,429}$ soit 1,4 %.

3. En n'utilisant plus d'engrais azotés, on réduit de 48,4 % les émissions de gaz à effet de serre. La plupart des engrais azotés sont des engrais chimiques. On peut diminuer encore les émissions de gaz à effet de serre de presque 39,4 %. On peut affirmer qu'avec des cultures moins dépendantes

des engrais azotés, on peut réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 50 %.

18. La voiture électrique, une voiture écologique ?

1. a. Le cycle de vie d'un objet rend compte de toutes les étapes de la vie de l'objet : fabrication, utilisation, transport et élimination.

b. Le bilan écologique des voitures doit prendre en compte les émissions de CO₂ sur le cycle de vie d'un objet pour ne pas être biaisé. En effet, les émissions de CO₂ peuvent être différentes suivant la fabrication, l'utilisation, etc. Pour comparer les bilans écologiques des deux véhicules, on doit donc le faire sur leur cycle de vie.

2. Pour l'assemblage des deux voitures, on a des émissions de CO₂ du même ordre de grandeur. Par contre pour la fabrication des composants, il y a environ deux fois plus d'émissions de CO₂ pour la batterie électrique que pour la batterie thermique. D'après le doc 1, l'extraction des métaux constituant la batterie de la voiture électrique nécessite des quantités considérables d'énergie donc des émissions de CO₂.

3. Il y a zéro émission de CO₂ lorsqu'une voiture électrique roule. Par contre, pour une voiture thermique, la combustion du carburant, un combustible fossile, produit du CO₂.

4. La Renault Zoe consomme une énergie de 22 kWh aux 100 km, donc pour 150 000 km elle

consomme une énergie égale à $22 \times \frac{150\,000}{100}$ kWh soit 33 000 kWh pour 150 000 km.

Sachant que la production d'un kilowattheure d'énergie électrique génère une masse de 89 g de dioxyde de carbone, la production de 33 000 kWh génèrera donc une masse de CO₂ égale à $89 \times 33\,000$ soit $2,9 \times 10^6$ g CO₂-eq ou 2,9 t CO₂-eq.

La valeur donnée par le quotidien ($m = 2,34$ t CO₂-eq) est cohérente avec la valeur calculée (2,9 t CO₂-eq).

5. a. Les masses m_{CO_2} de CO₂ rejeté pour chaque voiture sur leur cycle de vie lorsqu'elles parcourent 30 000 km, puis 40 000 km, sont données en t CO₂-eq dans le tableau suivant.

30 000 km parcourus		40 000 km parcourus	
Voiture électrique	Voiture thermique	Voiture électrique	Voiture thermique
7,04	7,39	7,19	8,61

Détail des calculs :

$$6,21 + 0,36 + \frac{30\,000 \times 2,34}{150\,000} \text{ soit } 7,04 \text{ t CO}_2\text{-eq.}$$

$$3,3 + 0,44 + \frac{30\,000 \times (15,84 + 2,42)}{150\,000} \text{ soit } 7,39 \text{ t CO}_2\text{-eq.}$$

$$6,21 + 0,36 + \frac{40\,000 \times 2,34}{150\,000} \text{ soit } 7,19 \text{ t CO}_2\text{-eq.}$$

$$3,3 + 0,44 + \frac{40\,000 \times (15,84 + 2,42)}{150\,000} \text{ soit } 8,61 \text{ t CO}_2\text{-eq.}$$

b. Les masses de CO₂ rejeté par chaque type de véhicule sont sensiblement identiques sur leur cycle de vie avec 30 000 km parcourus. Par contre, la différence est significative avec 40 000 km parcourus. On peut considérer que l'information donnée par le quotidien est correcte. On ne peut donner qu'un intervalle de valeurs pour le kilométrage car tout dépend du modèle de la voiture (puissance, consommation de carburant, etc.). Il peut

être possible que suivant les modèles comparés, la voiture électrique émette moins de CO₂ sur son cycle de vie que la voiture thermique pour moins de 30 000 km parcourus.

6. La voiture électrique a l'avantage de ne pas émettre de CO₂ lors de son usage, contrairement à une voiture thermique. Par contre, la fabrication de sa batterie nécessite des métaux qui demandent une quantité d'énergie importante avec émission de CO₂. Ces métaux sont, d'autre part, nocifs à l'environnement. La voiture électrique a une autonomie plus faible que celle de la voiture thermique et sa batterie est lente à recharger.

Les voitures électriques peuvent avoir un avenir en utilisant des métaux moins nocifs pour l'environnement, en recyclant les batteries, et éventuellement en réduisant la durée de recharge, en augmentant leur autonomie et leur durée de vie.

CHAPITRE 9 La biodiversité et son évolution

I. Introduction

Programme

Évaluer la biodiversité à différentes échelles spatiales et temporelles représente un enjeu majeur pour comprendre sa dynamique et les conséquences des actions humaines. Les populations évoluent au cours du temps. Des modèles mathématiques probabilistes et des outils statistiques permettent d'étudier les mécanismes évolutifs impliqués.

Savoirs	Savoir-faire
<p>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.</p> <p>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.</p> <p>À partir d'un seul échantillon, l'effectif d'une population peut également être estimé à l'aide d'un intervalle de confiance. Une telle estimation est toujours assortie d'un niveau de confiance strictement 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.</p>	<p>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). Quantifier l'effectif d'une population ou d'un taxon plus vaste à partir de résultats d'échantillonnage.</p> <p>Estimer une abondance par la méthode de capture, marquage, recapture, fondée sur le calcul d'une quatrième proportionnelle. À l'aide d'un tableur, simuler des échantillons de même effectif pour visualiser la fluctuation d'échantillonnage. En utilisant une formule donnée pour un intervalle de confiance au niveau de confiance de 95 %, estimer un paramètre inconnu dans une population de grande taille à partir des résultats observés sur un échantillon.</p>
<p>Au cours de l'évolution biologique, la composition génétique des populations d'une espèce change de génération en génération.</p> <p>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.</p> <p>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.).</p>	<p>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.</p> <p>Produire une démonstration mathématique ou un calcul sur tableur ou un programme en Python pour prouver ou constater que les probabilités des génotypes sont constantes à partir de la seconde génération (modèle de Hardy-Weinberg).</p> <p>Utiliser des logiciels de simulation basés sur ce modèle mathématique.</p> <p>Analyser une situation d'évolution biologique expliquant un écart par rapport au modèle de Hardy-Weinberg.</p>
<p>Les activités humaines (pollution, destruction des écosystèmes, combustions et leurs impacts climatiques, surexploitation d'espèces...) ont des conséquences sur la biodiversité et ses composantes (dont la variation d'abondance) et conduisent à l'extinction d'espèces.</p>	<p>Utiliser un modèle géométrique simple (quadrillage) pour calculer l'impact d'une fragmentation sur la surface disponible pour une espèce.</p> <p>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.</p>

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.

Analyser des documents pour comprendre les mesures de protection de populations à faibles effectifs.
Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème.
Envisager des solutions pour un environnement proche.

Prérequis et limites

Les notions déjà connues de gènes et d'allèles, de diversité allélique, de sélection naturelle, de dérive génétique, de calcul de probabilités et de fluctuation d'échantillonnage sont mobilisées (classe de seconde).

Commentaires pédagogiques

Le chapitre 9 porte sur la dynamique de la biodiversité et son lien éventuel avec les activités humaines. L'étude de la biodiversité est une thématique transversale au sein des programmes de sciences illustrant le caractère spiralaire de nos enseignements. Ainsi ce concept est défini dès le cycle 3 à travers le programme de sciences et technologie et approfondi en SVT au cycle 4 et en classe de seconde. Les élèves ont acquis les principales notions associées à ce concept et ont compris que la biodiversité actuelle n'est pas un état figé mais qu'elle est la résultante d'une dynamique qui s'explique par l'action de forces évolutives (sélection naturelle, dérive génétique, mutation et migration, même si cette dernière a été moins souvent abordée que les trois premières) qui s'exercent à toutes les échelles de temps. En Enseignement scientifique de terminale, un des objectifs nouveaux est de montrer qu'il est possible de faire appel aux outils mathématiques pour modéliser la dynamique de la biodiversité afin de mieux la comprendre, de la suivre (activités 1 et 2), d'anticiper son évolution (activité 3), et le cas échéant de la préserver (activité 4). On montre ainsi comment une approche rigoureuse et scientifique appliquée à des situations précises (par exemple fragmentation d'habitats ou autre atteinte d'écosystèmes naturels) permet de faire des choix éclairés de préservation de l'environnement. Ce chapitre permet donc d'envisager certaines problématiques d'aménagement du territoire aujourd'hui inenvisageables sans introduire l'interaction avec les systèmes vivants.

Ainsi, ce chapitre apporte peu de savoirs fondamentaux nouveaux mais remobilise et croise des savoirs de biologie avec des méthodes et des outils mathématiques simples, qui relèvent des programmes de mathématiques de collège ou de seconde (comptage, échantillonnage, traitement statistique des données, modélisation par une loi mathématique probabiliste...) ce qui est une approche nouvelle pour les élèves, notamment pour ceux qui n'ont pas suivi la spécialité SVT et/ou mathématiques.

Il paraît donc judicieux de traiter ce chapitre en faisant collaborer professeur de SVT et professeur de mathématiques, non que les notions mathématiques soient complexes en soi, mais pour les introduire dans un cadre didactique approprié.

L'étude de cas constitue une des approches à privilégier que ce soit en s'appuyant sur les données récoltées des grandes expéditions d'inventaire de biodiversité ou sur des problématiques locales d'aménagements urbains ou ruraux.

En termes de programmation, il est utile de noter que la loi d'Hardy-Weinberg et les notions qui y sont associées sont reprises et approfondies dans la spécialité SVT de terminale. Il serait donc judicieux de traiter ce chapitre d'Enseignement scientifique en amont du chapitre correspondant de spécialité SVT pour les groupes où les élèves sont concernés par cette spécialité.

Objectifs

- Identifier les méthodes de mesure de la biodiversité.
- Estimer l'effectif d'une population à partir d'échantillons.
- Montrer qu'au cours de l'évolution la composition génétique d'une population change.
- Montrer les effets des activités humaines sur la biodiversité et les relier aux mesures de gestion durable.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- L. Allano, A. Clamens, *Faits et mécanismes de l'évolution biologique*, Ellipses (2010).
- C. Tirard, R. Barbault, *Mini-manuel d'écologie*, Dunod (2012).
- J.-P. Henry, P.-H. Gouyon, *Précis de génétique des populations*, Dunod (2008).

► Sites Internet

- Site sur la biodiversité et les expéditions conduites par le MNHN :
<http://edu.mnhn.fr/course/view.php?id=117>
- Rapport sur l'expédition de Madibenthos 2016 :
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02473023/document>
- Site publiant l'étude faite sur les populations d'amphibiens et la mise en œuvre de mesures de protection :
https://biodiversite.normandie.fr/sites/default/files/ID27.4_suivi_genetique_amphibiens_2015.pdf
- Présentation de la trame verte et bleue par l'INPN :
<https://inpn.mnhn.fr/programme/trame-verte-et-bleue/presentation>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 164

1. b
2. b
3. a
4. c

Activités p. 166-173

Activité 1. Les méthodes de mesure de la biodiversité

• **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration, Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

L'objectif ici est double : prendre conscience de l'importance de mesurer la biodiversité pour suivre sa dynamique et comprendre les conséquences des activités humaines sur celles-ci, et appréhender la rigueur scientifique nécessaire à la mise en place d'un protocole de mesure de la biodiversité.

Une possibilité pour introduire la nécessité d'un protocole rigoureux de mesure de la biodiversité est d'utiliser l'exercice 13 page 178. Cela permet d'introduire une dimension historique et de montrer aussi que c'est une préoccupation de longue date.

Les deux premiers documents permettent de comprendre la méthode utilisée (choix du site et méthode d'échantillonnage). Les deux autres documents permettent de discuter les résultats obtenus.

• **Corrigés du guide de travail**

1. L'intérêt du choix de la Martinique est double. L'île présente de nombreux habitats différents, qui sont riches en espèces. Elle permet donc d'avoir une bonne estimation de la biodiversité. Elle est aussi exposée aux activités humaines donc il est possible de mesurer les conséquences des activités humaines sur la biodiversité.

2. Pour avoir une bonne estimation de la biodiversité, il faut être sûr de prélever au niveau de tous les habitats et de multiplier suffisamment les collectes pour échantillonner toutes les espèces, y compris les moins fréquentes.

503 opérations au total le permettent. Les différentes techniques permettent de récupérer toutes les espèces, quels que soient leurs mode et milieu de vie. Enfin la carte, si on la compare à celle du doc 1, montre que tous les habitats sont étudiés.

3. Les différentes échelles sont

- le nombre total d'espèces (richesse spécifique) : ici plus de 3 000 ;
- le nombre de groupes auxquels elles appartiennent et l'abondance relative de chaque [7 groupes proposés ici, certains ne comprennent

que quelques dizaines d'espèces alors que d'autres en présentent plusieurs centaines ou milliers) ;

- l'abondance relative des espèces, c'est-à-dire le nombre d'individus par espèce (doc 4).

Mais il faut nuancer : si 200 000 spécimens et 3 000 espèces ont été dénombrés, alors il n'y a qu'environ 67 individus par espèce en moyenne, ce qui n'est pas si élevé.

4. Plus de 67 % des spécimens ont été collectés entre 0 et 20 m de profondeur alors que seulement 8 % des spécimens proviennent d'une station à plus de 50 m de profondeur.

En termes de richesse spécifique, c'est dans les stations 0-20 m que la plus grande richesse spécifique est trouvée (entre 36 et 46 espèces). Cependant, une richesse spécifique considérable (32 espèces) est également observée dans la tranche 50-90 m, malgré le faible nombre d'individus collectés.

On peut donc dire que :

- l'abondance est une composante de la diversité également importante ;
- la bathymétrie est un facteur influençant la distribution des espèces.

Synthèse

La biodiversité de la Martinique est importante que ce soit au niveau des habitats occupés ou de la richesse spécifique. Mais certains groupes ne sont que peu représentés et les populations de certaines espèces sont de faible effectif.

Activité 2. Estimation de l'abondance d'une population

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

Le but de cette activité est de comprendre la technique de « capture-marquage-recapture » (CMR) et les modèles mathématiques associés.

Le premier document permet aux élèves d'appréhender le fonctionnement de la technique en manipulant et de proposer la relation de 4^e proportionnelle pour estimer une abondance.

Le deuxième document permet de revenir sur la notion d'intervalle de confiance abordée en classe de seconde (et en spécialité Mathématique).

Enfin le troisième document propose une application réelle de la CMR sur une population de sala-

mandres et permet un début de réflexion sur les limites du modèle mathématique.

• Corrigés du guide de travail

1. Le nombre de haricots dans le bocal est fixé à 150 pour la correction et on y place 25 haricots marqués.

Voici le nombre de haricots marqués par échantillon :

3 ; 7 ; 5 ; 5 ; 4 ; 4 ; 4 ; 5 ; 6 ; 3 ; 4 ; 2 ; 5 ; 5 ; 3 ; 10 ; 3 ; 4 ; 8 ; 4 ; 0 ; 4 ; 7 ; 2 ; 4.

On trouve en moyenne 3,8 haricots par échantillon, soit une fréquence de haricots marqués de $0,152 = 15,2\%$.

Ces 15,2 % représentent la proportion des 25 haricots marqués dans le pot ; on peut donc estimer qu'il y a environ $\frac{25}{0,152} \approx 164$ haricots dans le pot.

2. On a une fréquence de $\frac{20}{42} \approx 0,48 \approx 48\%$ de salamandres marquées lors de la recapture.

On avait marqué initialement 27 salamandres ; on peut donc estimer l'abondance de la population de salamandres à $\frac{27}{0,48} \approx 6$ individus.

3. On a $f \approx 0,48$ et $n = 42$.

$$f - \frac{1}{\sqrt{n}} \approx 0,48 - \frac{1}{\sqrt{42}} \approx 0,33 \approx 33\%$$

$$f + \frac{1}{\sqrt{n}} \approx 0,48 + \frac{1}{\sqrt{42}} \approx 0,63 \approx 63\%$$

Il y a 95 % de chance que la proportion de salamandres marquées soit comprise entre 33 % et 63 %.

4. L'abondance d'une population entre les deux captures peut être modifiée par une migration d'individus et par les naissances ou décès.

Le modèle mathématique comporte plusieurs hypothèses pour être appliqué :

- l'effectif de la population est constant (pas de naissance, de mort, de migration) ;
- le mélange des animaux marqués entre la capture et la recapture est homogène ;
- les tirages sont aléatoires.

Synthèse

Si on note A l'abondance de la population, N_{MC} le nombre d'individus marqués lors de la capture, N_{MR} le nombre d'individus marqués lors de la recapture et N_C le nombre d'individus lors de la recapture, on a :

$$A = \frac{N_{MC} \times N_C}{N_{MR}}$$

Cette méthode est limitée par les hypothèses du modèle mathématique :

- l'effectif de la population est constant (pas de naissance, de mort, de migration) ;
- le mélange des animaux marqués avant la recapture est homogène ;
- les tirages sont aléatoires.

De plus, la taille de l'échantillon lors de la recapture doit être suffisamment grande pour assurer une bonne précision dans l'estimation de l'abondance.

Activité 3. Évolution génétique d'une population

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

L'objectif ici est de montrer l'intérêt d'un modèle pour étudier et comprendre l'évolution génétique d'une population. Le modèle sert de référence et l'étude de la population par rapport à cette référence permet de mettre en évidence l'existence de forces évolutives.

Le premier document présente le modèle de Hardy-Weinberg.

Le second document présente la population étudiée. Un travail sur cette population montrera si elle répond ou non au modèle. Dans le cas présent, elle n'y répond pas ce qui permet de déduire qu'une force évolutive s'exerce sur cette population (en supposant que les autres hypothèses du modèle sont bien vérifiées).

Le document 3 permet d'identifier la force évolutive s'exerçant sur la population.

- **Corrigés du guide de travail**

1. a. $f(A) = f(A/A) + \frac{1}{2} f(A/a)$

On a $f(A/A) = p^2$ et $f(A/a) = pq + pq = 2pq$

$$f(A) = p^2 + \frac{1}{2} \times 2pq = p^2 + pq = p(p + q)$$

Comme $p + q = 1$, on a alors $f(A) = p$.

On trouve de même que $f(a) = q$

b. Les deux fréquences alléliques sont identiques d'une génération à l'autre, le système est à l'équilibre.

2. Le nombre total d'individus est 6 840.

On a donc les fréquences génotypiques :

$$f(A/A) = \frac{5\,478}{6\,840} \approx 0,801 \approx 80,1 \%$$

$$f(A/a) = \frac{1\,349}{6\,840} \approx 0,197 \approx 19,7 \%$$

$$f(a/a) = \frac{13}{6\,840} \approx 0,002 \approx 0,2 \%$$

Et les fréquences alléliques :

$$f(A) \approx 0,801 + \frac{1}{2} \times 0,197 \approx 0,9 \approx 90 \%$$

$$f(a) \approx 0,002 + \frac{1}{2} \times 0,197 \approx 0,1 \approx 10 \%$$

Remarque : il est possible de faire vérifier la cohérence de leurs résultats aux élèves : la somme des fréquences génotypiques doit être égale à 1. De même pour la somme des fréquences alléliques.

3. a. Les fréquences alléliques sont $f(A) = 0,9$ et $f(a) = 0,1$.

Si la population suit le modèle de Hardy-Weinberg alors :

$$f(A/A) = p^2 \text{ soit } f(A/A) = 0,9^2 = 0,810$$

$$f(A/a) = 2pq \text{ soit } f(A/a) = 2 \times 0,9 \times 0,1 = 0,180$$

$$f(a/a) = q^2 \text{ soit } f(a/a) = 0,1^2 = 0,010$$

b. Ces fréquences sont différentes de celles calculées à partir des effectifs (question 2). Donc la population ne suit pas le modèle de Hardy-Weinberg. Une des hypothèses du modèle n'est pas vérifiée : une force évolutive s'exerce.

4. On remarque une concordance entre les deux cartes : là où l'allèle Hb^s est le plus fréquent, le paludisme est présent. Or, les individus porteurs sains de la drépanocytose présentent une meilleure résistance au paludisme (lien possible avec la notion de valeur sélective). Donc le paludisme exerce une pression de sélection, ces individus sont sélectionnés, ce qui amène à une plus forte fréquence de l'allèle Hb^s dans ces régions.

Remarque : les populations étudiées sont situées dans les régions où l'allèle Hb^s (noté a) est de fréquence supérieure à 20 %. Or les calculs donnent une fréquence de 10 %. Deux explications : effet d'échantillonnage des populations et différence de date auxquels ont été établis les deux documents (il y a donc eu évolution des fréquences entre deux).

Synthèse

Le modèle de Hardy-Weinberg est un modèle mathématique théorique qui permet de décrire, sous certaines conditions, l'évolution génétique d'une population. Il faut que les mâles et femelles s'associent au hasard, que la population étudiée soit de très grande taille et qu'il y ait absence de forces évolutives (migration, dérive génétique, mutation ou sélection naturelle). Sous ces hypo-

thèses, les fréquences alléliques et les fréquences génotypiques restent constantes d'une génération à une autre. On parle alors d'équilibre de Hardy-Weinberg.

Les variations des proportions des différents génotypes (d'une génération à l'autre) d'une population montrent les effets des forces évolutives.

Activité 4. La préservation de la biodiversité

- **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement
- **Commentaires sur l'activité**

L'objectif ici est de montrer les effets possibles des activités humaines sur la biodiversité et de montrer que les mesures prises dans le cadre d'une gestion durable sont choisies en fonction des effets observés.

Ceci permet de faire établir un lien entre effet des activités humaines et mesure de gestion durable. Cela permet donc de faire comprendre que les mesures décidées résultent d'un choix réfléchi s'appuyant sur des études scientifiques rigoureuses.

L'exemple choisi est la fragmentation de l'habitat. Le premier document montre la fragmentation et son analyse. Les deux documents suivants montrent les conséquences de la fragmentation sur la biodiversité. Le dernier document présente les mesures prises pour maintenir la biodiversité, en lien avec les effets de la fragmentation sur la biodiversité.

• Corrigés du guide de travail

1. Il y a $18 \times 16 = 288$ carrés sur le quadrillage.

On dénombre 35 carrés constitués entièrement par la route et $35 + 65 = 100$ carrés constitués tout ou en partie par la route.

Le pourcentage de surface occupé par la route est donc compris entre $\frac{35}{288} \approx 12\%$ et $\frac{100}{288} \approx 35\%$.

2. Dans le cas où la population a pour effectif 20 individus, un des allèles disparaît dans 8 simulations sur 10. Par contre dans le cas où la population a pour effectif 100 individus, un des allèles ne disparaît que dans une simulation sur les 10 effectuées.

Donc, si l'effectif est faible, alors la diversité génétique (nombre d'allèles) tend à diminuer.

Sur l'effectif de 20 individus, on remarque qu'il y a autant de chances que ce soit l'allèle A ou l'allèle

a qui disparaisse. C'est donc une évolution génétique aléatoire. C'est de la dérive génétique.

La fragmentation provoque la formation, à partir d'une population initiale, de plusieurs populations isolées qui sont donc de plus faible effectif. La diversité génétique de chaque population isolée, étant de plus faible effectif, va diminuer par dérive génétique.

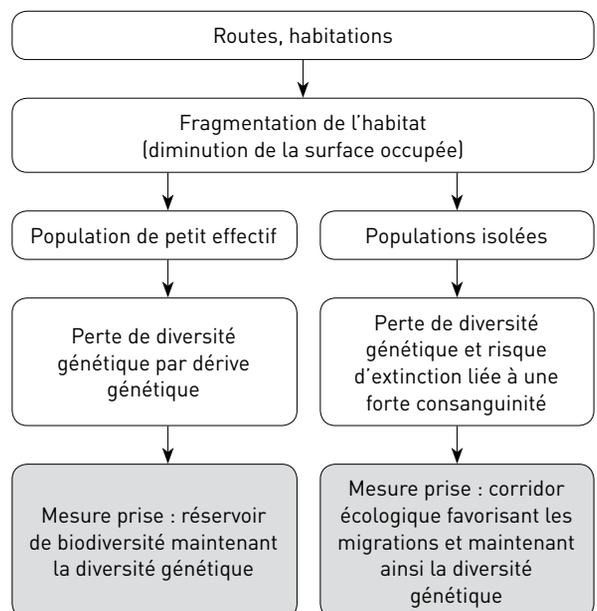
3. On compare deux types de populations : des populations à moins de 500 mètres d'une route, subissant donc les effets de la présence de cette route, et des populations à plus de 500 mètres la route ne subissant pas les effets de la route. Cette seconde catégorie sert de référence (témoin).

L'indice de consanguinité des populations situées à moins de 500 mètres de la route est environ 30 % plus élevé que celui des populations situées à plus de 500 mètres de la route.

Donc, au vu des explications dans le texte, on peut en déduire que ces populations sont isolées. La conséquence est que la diversité génétique est plus faible dans ces populations, ce qui accroît leur risque d'extinction.

4. Étant donné les effets de la fragmentation observés (perte de diversité génétique liée à un faible effectif et liée à un isolement des populations), il faut mettre en place des mesures qui maintiennent la diversité génétique (réservoir de biodiversité) et réduisent l'isolement des populations (corridor écologique). C'est ce qui est proposé par la trame verte et bleue.

Synthèse



Se tester

p. 176

1. a. Vrai b. Faux c. Vrai
2. b
3. b, c et d
4. a
5. a et c
6. a, b, c et d
7. a. Faux b. Vrai c. Faux
8. a et d

Travailler des compétences scientifiques

p. 177

10. Analyser des données

- La biodiversité peut se définir par la richesse spécifique, c'est-à-dire le nombre d'espèces. Le nombre total d'espèces ici est 1 571.
- Elle peut aussi se définir par l'abondance d'une population. Le nombre total d'individus est 4 734.
- Il est possible de calculer le nombre moyen d'individus par espèce.

En arrondissant à l'entier :

Fourmis : $\frac{217}{78} \approx 3$ individus par espèce

Vespidés : $\frac{160}{28} \approx 6$ individus par espèce

Ichneumonidés : $\frac{276}{200} \approx 1$ individu par espèce

Lépidoptères diurnes : $\frac{685}{266} \approx 3$ individus par espèce

Lépidoptères nocturnes : $\frac{2\,305}{754} \approx 3$ individus par espèce

Orthoptères : $\frac{900}{180} \approx 5$ individus par espèce

Odonates : $\frac{191}{65} \approx 3$ individus par espèce

La biodiversité se définit par l'abondance relative des groupes. Il y a par exemple 12 fois plus de Lépidoptères nocturnes que d'Odonates.

- Conclusion : la biodiversité apparaît importante, de nombreuses espèces sont répertoriées. Mais, il n'y a que peu d'individus par espèce (entre 1 et 6 individus par espèce) !

Appliquer

p. 178

11. Méthode de « capture-marquage-recapture »

1. Lors de la recapture, il y a une fréquence

$$f = \frac{116}{400} = 0,29 = 29\% \text{ de manchots marqués parmi les } n = 400 \text{ manchots échantillonnés.}$$

$$f - \frac{1}{\sqrt{n}} \approx 0,29 - \frac{1}{\sqrt{400}} \approx 0,24 \approx 24\%$$

$$f + \frac{1}{\sqrt{n}} \approx 0,29 + \frac{1}{\sqrt{400}} \approx 0,34 \approx 34\%$$

L'intervalle de confiance à 95 % de la proportion de manchots marqués de cet échantillon est [0,24 ; 0,34].

2. $\frac{232}{0,34} \approx 682$ et $\frac{232}{0,24} \approx 967$.

L'abondance est donc comprise entre 682 et 967.

12. Étude d'une population d'abeilles

1. Le modèle de Hardy-Weinberg est un modèle mathématique théorique qui permet de décrire l'évolution génétique d'une population sous certaines conditions :

- association au hasard des gamètes ;
- population de très grande taille ;
- absence de forces évolutives.

Sous ces conditions, les fréquences alléliques et génotypiques restent constantes d'une génération à l'autre.

Si p et q sont les fréquences respectives des allèles A et a, alors les fréquences des génotypes sont : p^2 pour le génotype A/A, $2pq$ pour le génotype A/a et q^2 pour le génotype a/a.

2. a. $f(A/A) = \frac{20}{40} = 0,5 = 50\%$

$$f(A/a) = \frac{6}{40} = 0,15 = 15\%$$

$$f(a/a) = \frac{14}{40} = 0,35 = 35\%$$

b. $f(A) = 0,5 + \frac{1}{2} \times 0,15 = 0,575 = 57,5\%$

$$f(a) = 0,35 + \frac{1}{2} \times 0,15 = 0,425 = 42,5\%$$

3.

	Allèle A	Allèle a
Allèle A	$0,575^2$	$0,575 \times 0,425$
Allèle a	$0,575 \times 0,425$	$0,425^2$

On a les proportions suivantes :

$$f(A/A) = 0,575^2 \approx 0,33$$

$$f(A/a) = 2 \times 0,575 \times 0,425 \approx 0,49$$

$$f(a/a) = 0,425^2 \approx 0,18$$

Ces valeurs sont différentes de celles obtenues en question 2a. Donc cette population ne respecte pas les proportions attendues à l'équilibre de Hardy-Weinberg. Cela signifie qu'une des conditions du modèle n'est pas validée.

S'entraîner

p. 178-179

13. Le voyage de Bougainville

1. Les composantes de la biodiversité utilisées dans la description faite de Bougainville sont :

- les groupes d'espèces : il commence la description par les espèces de poissons (ligne 1) puis par les espèces de crustacés (ligne 12) et enfin par les espèces de coquillages (ligne 16) ;
- les noms d'espèces (lignes 4, 5, 6...);
- l'abondance relative (ligne 10 du texte).

2. Le texte semble simplement décrire les espèces observées mais :

- il ne semble pas chercher systématiquement à échantillonner toutes les espèces ou tous les habitats (lignes 8 et 10) ;
- il ne semble pas chercher à nommer toutes les espèces observées (ligne 1 à 3 et lignes 10 et 11) voire il donne un nom d'espèce déjà connue à une autre espèce (lignes 2 et 3) ;
- il n'y a pas de comptage du nombre d'individus d'une espèce.

L'approche ne semble donc pas aussi rigoureuse que celle pratiquée actuellement. Or, pour avoir une idée exacte de la biodiversité, il est nécessaire d'adopter une démarche rigoureuse, d'autant qu'ensuite cette estimation de la biodiversité peut conduire à la mise en place de mesures de préservation coûteuses.

14. Richesse spécifique en Haute Maurienne

La richesse spécifique (nombre d'espèces moyen par placette) est un critère permettant de décrire la biodiversité. On constate que plus *Brachypodium* est présent et plus la richesse est faible (de 25 à 15 espèces). Donc *Brachypodium* tend à diminuer la biodiversité des prairies. Cela peut s'expliquer par son pouvoir de colonisation très important.

Une recommandation possible est donc de limiter la présence de cette espèce.

Étant donné que l'étude a été menée après l'arrêt de la fauche des prairies, on peut supposer que la fauche limite la présence de *Brachypodium*. Une recommandation possible est donc de limiter la présence de cette espèce par la fauche régulière de la prairie.

15. Suivi de population d'écrevisses à pattes blanches

1. On trouve les effectifs d'écrevisse suivants :

Station 1 : 14

Station 2 : 63

Station 3 : 648

Station 4 : 209

Station 5 : 32

2. On trouve les densités suivantes (en individus par m²) :

Station 1 : 0,06

Station 2 : 0,27

Station 3 : 3,43

Station 4 : 1,12

Station 5 : 0,24

3. Si on classe les stations dans l'ordre décroissant des effectifs on a : $3 > 4 > 2 > 5 > 1$.

Si on classe les stations dans l'ordre décroissant des densités on a le même résultat sauf pour les stations 2 et 5. Alors que la station 2 présente un effectif 2 fois plus grand environ que la station 5, la densité est en réalité quasiment la même dans les deux stations ! Donc l'effectif n'est qu'une valeur relative qu'il faut utiliser avec prudence pour conclure sur l'importance de la population.

16. Le scarabée pique-prune et l'autoroute A28

1. L'autoroute passe par des noyaux d'habitat de Pique-prune et son implantation fragmente donc l'habitat de cet insecte. Or cet insecte n'est pas capable de se disperser au-delà de 300 mètres. Donc la fragmentation isolerait les populations de pique-prune ce qui augmente le risque d'extinction (perte de diversité génétique).

2. Des mesures possibles sont de créer des corridors écologiques et des réservoirs de biodiversité.

17. Composition génétique d'une population de lézards

$$1. f(A/A) = \frac{254}{737} \approx 0,34 \approx 34 \%$$

$$f(A/a) = \frac{236}{737} \approx 0,32 \approx 32 \%$$

$$f(a/a) = \frac{247}{737} \approx 0,34 \approx 34 \%$$

$$f(A) \approx 0,34 + \frac{1}{2} \times 0,32 \approx 0,5 \approx 50 \%$$

$$f(a) \approx 0,34 + \frac{1}{2} \times 0,32 \approx 0,5 \approx 50 \%$$

2.

	Allèle A	Allèle a
Allèle A	0,5 ²	0,5 × 0,5
Allèle a	0,5 × 0,5	0,5 ²

On a les proportions suivantes :

$$f(A/A) = 0,5^2 = 0,25$$

$$f(A/a) = 2 \times 0,5 \times 0,5 = 0,5$$

$$f(a/a) = 0,5^2 = 0,25$$

3. Les proportions obtenues en appliquant le modèle question 2 sont différentes de celles calculées question 1 à partir des effectifs observés. Donc, cette population ne respecte pas les proportions attendues à l'équilibre de Hardy-Weinberg : une force évolutive est donc à l'œuvre.

4. *Cas de la population initiale constituée majoritairement de mâles à gorge orange :*

Les lézards à gorge jaune peuvent pénétrer dans leur territoire et se reproduire : leur proportion augmente, ce qui permet aussi le développement

des mâles à gorge bleue (cf. cas suivant). Les proportions s'équilibrent.

Cas de la population initiale constituée majoritairement de mâles à gorge jaune :

Les lézards à gorge bleue coopèrent, ce qui diminue la proportion de ceux à gorge jaune, et sont donc avantagés : leur proportion augmente. Ceci permet le développement de ceux à gorge orange (cf. cas suivant). Les proportions s'équilibrent.

Cas de la population initiale constituée majoritairement de mâles à gorge bleue :

Les lézards à gorge jaune ne peuvent proliférer mais ceux à gorge orange conquièrent le territoire des bleus : ils deviennent majoritaires.

Il existe donc une sélection liée au comportement des différents mâles, ce qui explique que la population ne suive pas le modèle de Hardy-Weinberg.

18. La fragmentation en milieu aquatique

Deux cours d'eau d'une même région sont comparés. L'un (le Viaur) présente trois fois plus d'obstacles que l'autre (le Célé). Le Célé constitue donc l'équivalent d'un témoin. La comparaison permet d'étudier l'effet d'une fragmentation du cours d'eau.

Sauf pour le Vairon, on constate que la diversité génétique est plus élevée chez les différentes espèces de poisson dans le Célé que dans le Viaur (de 1 à 2 allèles de plus en moyenne). La fragmentation diminue donc la diversité génétique. Il y a donc bien nécessité de mettre en place une mesure de gestion durable dans le Viaur pour limiter les effets de la fragmentation (appauvrissement génétique des populations). Un exemple pourrait être des passes à poisson.

CHAPITRE 10 L'évolution comme grille de lecture du monde

I. Introduction

Programme

Les concepts de biologie évolutive ont une large portée explicative, présentée ici à travers plusieurs exemples. Ils permettent de comprendre l'anatomie comme le résultat d'une longue histoire évolutive, faite d'adaptations, de hasard, de contingences et de compromis. Les concepts de variation et de sélection naturelle éclairent des pratiques humaines (médicales et agricoles) et certaines de leurs conséquences.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Les structures anatomiques présentent des particularités surprenantes d'un point de vue fonctionnel, pouvant paraître sans fonction avérée ou bien d'une étonnante complexité. Elles témoignent de l'évolution des espèces, dont la nôtre. Les caractères anatomiques peuvent être le résultat de la sélection naturelle mais certains sont mieux expliqués par l'héritage de l'histoire évolutive que par leur fonction. L'évolution permet de comprendre des phénomènes biologiques ayant une importance médicale. L'évolution rapide des organismes microbiens nécessite d'adapter les stratégies prophylactiques, les vaccins et les antibiotiques. Depuis la révolution agricole, la pratique intensive de la monoculture, la domestication et l'utilisation de produits phytosanitaires ont un impact sur la biodiversité et son évolution.</p>	<p>Expliquer l'origine d'une structure anatomique en mobilisant les concepts de hasard, de variation, de sélection naturelle et d'adaptation (exemple de l'œil) Interpréter des caractéristiques anatomiques humaines en relation avec des contraintes historiques (comme le trajet de la crosse aortique), des contraintes de construction (comme le téton masculin), des compromis sélectifs (comme les difficultés obstétriques) ou des régressions en cours (comme les dents de sagesse) Mobiliser des concepts évolutionnistes pour expliquer comment des populations microbiennes pourront à longue échéance ne plus être sensibles à un vaccin (ou un antibiotique) ou comment l'utilisation de produits phytosanitaires favorise le développement de ravageurs des cultures qui y sont résistants.</p>
<p>Prérequis et limites Il n'est pas attendu de développement spécifique en matière d'embryologie ou d'agronomie.</p>	

Commentaires pédagogiques

Ce chapitre s'inscrit explicitement dans la thématique de l'évolution qui, depuis le cycle 3, représente un des fils rouges de la compréhension du monde vivant par les élèves. Il complète et achève ainsi leur formation sur ce concept, quel que soit leur parcours en cycle terminal. Les élèves qui suivent la spécialité SVT en terminale pourront, pour leur part, approfondir d'un point de vue plus fondamental les processus génétiques et non-génétiques à l'origine de la diversité du vivant aux différentes échelles. En Enseignement scientifique, il n'est donc pas nécessaire de rentrer dans le détail des mécanismes. Il faut avant tout s'appuyer sur ce que l'élève sait déjà des variations spontanées qui apparaissent par hasard d'une génération à l'autre (que l'on peut, sans entrer dans le détail, associer aux mutations) et sur leur devenir après passage au crible de la sélection naturelle. L'étude au niveau du phénotype est donc suffisante. Ce ne sont donc pas tant des savoirs nouveaux à faire acquérir aux élèves que des exemples d'applications de ces savoirs à des contextes ou des situations plus globales d'un point de vue spatial et/ou temporel, donc d'apparence plus complexes mais correspondant à une réalité facilement perceptible (structures anatomiques, enjeux de santé publique, etc.).

L'enjeu du chapitre 10 est de faire comprendre aux élèves que le raisonnement évolutionniste est un système explicatif rationnel et performant pour comprendre le monde vivant qui nous entoure et d'illustrer ainsi l'adage célèbre de Théodosius Dobzhansky selon lequel « Rien en biologie n'a de sens, sinon à la lumière de l'évolution ». Les activités proposées sont donc construites autour d'exemples que l'on peut analyser simplement avec une lecture évolutive.

Ce chapitre va néanmoins plus loin que le niveau explicatif que les élèves ont appris à mobiliser en cycle 4 et en seconde en interprétant par exemple l'évolution d'un caractère dans une population par l'action de

la sélection naturelle (exemple de la couleur des phalènes). En effet, il insiste aussi sur l'importance du temps long et de la succession d'étapes qui mènent à la complexité des structures (exemple de l'œil qui ne doit pas être compris comme un caractère sélectionné mais comme une multitude d'innovations sélectionnées successivement), mais aussi l'importance de l'héritage évolutif qui explique la présence de caractères que l'on ne peut expliquer directement par l'action de la sélection naturelle (par exemple les difficultés obstétriques liées à la grossesse humaine que l'on ne peut comprendre qu'en se penchant sur les grandes tendances évolutives de la lignée humaine qui expliquent aussi son succès : la bipédie et l'augmentation du volume crânien). Les élèves doivent comprendre ainsi que les structures visibles aujourd'hui sont le résultat de multiples sélections du passé dont il n'est pas aisé de retrouver toutes les étapes et qui masquent par ailleurs tous les échecs dont ne subsistent que peu de témoignages. Enfin, il montre aussi que le raisonnement évolutif permet d'apporter des éléments de compréhension à de grands enjeux contemporains de développement durable (relation entre biodiversité et pratiques agricoles) et médicaux (résistances aux antibiotiques). Ces deux derniers points s'inscrivent pleinement dans la construction d'une culture scientifique solide et utile pour les citoyens en devenir que sont les élèves.

En explicitant la portée explicative du raisonnement évolutionniste, notamment l'apport des phylogénies, il répond à l'objectif « Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration » du programme mais en faisant comprendre « *en quoi la culture scientifique est aujourd'hui indispensable pour saisir l'évolution des sociétés comme celle de l'environnement et de contrôler cette évolution* », il répond aussi à l'objectif « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement ».

Un certain nombre de vigilances sont à prendre en compte et tout particulièrement l'importance de la rigueur du discours et de la formulation des idées qui, dans le cadre de la pensée évolutionniste, permettent la neutralisation des visions finalistes ou des pensées essentialistes. Aussi il est essentiel d'insister sur le caractère contingent des événements décrits et sur la place prépondérante du hasard. Toutefois, il est important aussi que les élèves comprennent que si le hasard joue un rôle fondamental à l'échelle de la variation, la constante adaptation des organismes vivants aux changements du milieu illustre l'importance du rôle joué par la pression de sélection sur la conservation prévisible de certaines propriétés acquises antérieurement (ex : la diversité du vivant produite par des variations aléatoires est telle qu'il est quasi inéluctable que des populations résistantes à des antibiotiques apparaissent si l'on n'adopte pas des comportements d'usage de ces molécules prenant en compte cette dimension de l'évolution du vivant).

Enfin certains points de ce chapitre peuvent bousculer certaines convictions religieuses des élèves. La capacité à distinguer les faits, les opinions et les croyances est donc ici essentielle et doit être mobilisée et travaillée si nécessaire, en répondant ainsi à l'indispensable développement de l'esprit critique des élèves futurs citoyens et adultes responsables.

Objectifs

- Comprendre comment des variations aléatoires et la sélection naturelle permettent l'apparition d'organes complexes.
- Montrer que certains caractères anatomiques s'expliquent par l'héritage de l'histoire évolutive des êtres vivants.
- Montrer que l'évolution rapide des organismes microbiens nécessite d'adapter les stratégies médicales.
- Montrer que les conséquences des pratiques agricoles en termes d'évolution ont un impact sur la biodiversité.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- G. Lecointre, *Guide critique de l'évolution*, Belin (2009).
- G. Lecointre, *L'évolution, question d'actualité ?*, Quae (2014).

► Sites Internet

- Ressources sur l'antibiorésistance et sur différentes maladies :
<https://www.who.int/fr> (OMS)
<https://www.inserm.fr/>
- Ressources sur l'agriculture :
<http://www.fao.org/home/fr/>
<https://www.inrae.fr/>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 182

1. b
2. a et b
3. a et b
4. a et c

Activités p. 184-191

Activité 1. L'évolution de la structure de l'œil

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration
- **Commentaires sur l'activité**

L'objectif de cette activité est de montrer comment un organe comme l'œil, qui semble incroyablement complexe, résulte d'une structure beaucoup plus simple qui a accumulé progressivement une succession d'innovations évolutives. Elle s'inscrit dans l'objectif général de formation « Comprendre la nature du savoir et ses méthodes d'élaboration » dans lequel le savoir scientifique doit se distinguer d'une croyance ou d'une opinion. En effet, l'œil est utilisé comme un argument par les créationnistes qui veulent remettre en cause les mécanismes biologiques de l'évolution. Pourtant, sa complexité s'explique par les mécanismes de sélection naturelle et, comme toute structure biologique, il présente des imperfections (exemple de la tache aveugle). Cette problématique peut être la

source d'une présentation orale que nous proposons dans une variante pédagogique.

• Corrigés du guide de travail

1. La mise en relation des données présentées dans le tableau du document 1 montre que la complexité de l'organe visuel est liée au mode de vie de chaque mollusque. Alors que la patelle qui vit fixée possède de simples photorécepteurs qui lui permettent de distinguer la présence ou non de lumière, l'espèce fossile *Pleurotomariacea* qui se déplace lentement peut distinguer la provenance de la source lumineuse. Le nautilite qui chasse des crustacés peu mobiles possède un œil qui lui permet de distinguer des formes qui seront perçues de façon encore plus nettes chez la seiche qui chasse des proies plus véloces. La mobilité de ces organismes est donc corrélée avec la qualité de la perception visuelle de leur environnement. À l'inverse, on constate une régression de l'œil chez le rat taupe qui n'utilise pas cet organe. En effet, le facteur du milieu responsable de sa sélection (la lumière) ne s'exerce plus, ce qui confirme son rôle.

2. La comparaison de la structure de l'organe de vision chez les différentes espèces de mollusques présentées dans le tableau du premier document permet d'établir l'arbre phylogénétique du document 2 qui montre que les innovations évolutives ne sont pas apparues en même temps, mais qu'elles se sont accumulées au cours de l'évolution. Ces apparitions progressives ont permis de diversifier les modes de vie de ce groupe dont toutes les innovations évolutives ont été conservées chez la seiche.

3. L'œil humain possède des innovations semblables à celles d'une seiche. Cependant, à cause de l'organisation cellulaire de la rétine de notre œil, les photorécepteurs se retrouvant sous plusieurs couches de neurones que la lumière doit traverser, on a une légère perte de luminosité captée par la rétine et il existe une zone où aucune image ne se forme (la tache aveugle). L'œil de la seiche, qui a ses photorécepteurs à la surface de sa rétine, ne présente pas ces deux contraintes. De ce point de vue, il est donc plus performant que le nôtre.

Synthèse

Quand des variations confèrent un avantage, elles ont plus de chances d'être conservées et transmises à la descendance, c'est la sélection naturelle. L'accumulation de ces variations sélectionnées par le milieu au cours du temps a permis l'émergence de structures de plus en plus complexes telles que l'œil de la seiche et celui de l'espèce humaine. Les innovations se font au hasard et s'accumulent au cours du temps.

Activité 2. Des traces de l'évolution dans notre anatomie

- **Objectif :** Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

- **Commentaires sur l'activité**

L'objectif de cette activité est de montrer que, si l'évolution a permis l'émergence de structures complexes comme l'œil humain et celui de la seiche, elle est soumise à des contraintes diverses qui limitent la variabilité phénotypique. Ces contraintes et les vestiges des structures anatomiques qui sont aujourd'hui à l'état atrophié ou qui ont en partie disparu témoignent du fonctionnement de l'évolution qui repose sur les principes étudiés dans la première activité, à savoir l'accumulation d'innovations génétiques apparues au hasard puis sélectionnées par le milieu.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Certaines innovations évolutives subissent des compromis ou sont liées à l'histoire évolutive de l'anatomie de l'espèce. Le document 1 montre que la présence d'un bassin plus étroit complique le passage de la tête du bébé dont le volume a augmenté au cours de l'évolution de la lignée humaine. Le tableau montre que l'on est passé de 450 à 1 450 cm³ en un peu plus de trois millions d'années. Cependant l'apparition de la bipédie s'ac-

compagne d'un rétrécissement du bassin. L'émergence de la bipédie a donc eu pour conséquence une augmentation des risques de mortalité lors de l'accouchement mais sans que cela soit préjudiciable à la survie des espèces.

La présence de tétons chez l'homme s'explique par une contrainte de construction. En effet, ces tétons apparaissent très précocement au cours du développement embryonnaire. L'absence de réel désavantage et le coût énergétique supplémentaire lié à leur suppression explique leur maintien.

L'apparition de l'externalisation des testicules au cours de l'évolution s'est accompagnée d'une augmentation de la longueur du canal déférent qui les relie à la prostate. La disparition de ce canal pour le remplacer par un autre plus court étant trop complexe, le canal a donc été maintenu même s'il est devenu moins fonctionnel.

2. Quand certaines caractéristiques n'apportent plus d'avantage en termes de sélection naturelle, elles peuvent disparaître progressivement au cours du temps.

Synthèse

Certaines structures ne s'expliquent pas par l'action de la sélection naturelle, comme par exemple la longueur du canal déférent qui s'explique par la position originelle des testicules, ou encore l'existence de dents de sagesse qui n'apportent plus d'avantage en terme de sélection naturelle. Enfin, certaines structures qui ne sont plus utiles comme les tétons masculins subsistent aujourd'hui à l'état atrophié.

Activité 3. Évolution microbienne et enjeux médicaux

- **Objectif :** Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

L'objectif de cette activité est de montrer que l'évolution rapide des organismes microbiens nécessite d'adapter les stratégies médicales. Cela permet de mettre en évidence que les mécanismes de l'évolution s'exercent aussi à l'échelle humaine. Cette activité s'inscrit dans l'objectif général de formation « Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés ». En effet la résistance des bactéries aux antibiotiques et l'émergence de nouveaux virus pouvant être à l'origine d'épidémies voire de pandémies posent des problèmes

majeurs de santé publique à l'origine de nombreux décès annuels.

À l'heure où cet ouvrage est écrit, la crise sanitaire liée au Covid-19 est en cours. Ayant peu de recul sur cette crise, il a été décidé de maintenir l'activité telle qu'elle a été rédigée initialement où l'exemple de la grippe est traité. Tous les éléments relatifs à la grippe peuvent être transposés au coronavirus. Pour cela, un dossier d'accompagnement de la pandémie Covid-19 est en cours de constitution, il réunira progressivement des ressources qui seront accessibles à l'adresse suivante :

http://accs.ens-lyon.fr/accs/thematiques/sante/epidemies-et-agents-infectieux/covid-19/index_html

Cette thématique permet également d'aborder la rubrique Histoire, enjeux et débat, plus précisément les grandes avancées médicales. Les exercices 13 et 14 y sont consacrés. Ils peuvent être traités préalablement à l'activité.

• Corrigés du guide de travail

1. Au sein des populations bactériennes, des mutations se produisent et certaines conduisent, au hasard, à l'acquisition de la résistance à un antibiotique. Ces mutations préexistent à l'application de l'antibiotique. Si on applique cet antibiotique sur une population bactérienne, seules les bactéries y étant sensibles seront tuées. Les bactéries résistantes vont survivre et se multiplier rapidement.

2. Les mesures d'hygiène (lavage des mains, etc.) permettent de limiter les contaminations. Les campagnes de prévention permettent d'informer les professionnels de santé et la population afin de mieux contrôler l'usage des antibiotiques (bonne indication, bonne molécule, bonne dose, bonne durée).

3. Le virus de la grippe, comme tous les virus, a une grande variabilité génétique : il mute en permanence. Les virus peuvent se recombiner entre eux et peuvent émerger d'un réservoir animal. Ces trois mécanismes peuvent conduire à l'apparition d'un nouveau virus susceptible d'être à l'origine d'une pandémie car la population n'a pas d'immunité collective face à cette nouvelle souche virale.

4. Du fait de la forte variabilité du virus de la grippe, qui crée en permanence de nouvelles souches

virales à l'origine des épidémies saisonnières, il est nécessaire de se faire vacciner chaque année avec un vaccin contenant les souches virales que l'OMS pense être celles qui vont circuler au cours de l'épidémie.

Synthèse

Les bactéries comme les virus sont des organismes microbiens qui évoluent rapidement (grande variabilité génétique et taux de reproduction rapide). Cette évolution est observable à l'échelle des vies humaines. Ces phénomènes biologiques ont une importance médicale car ils nécessitent une adaptation des stratégies médicales :

- Lutter contre la résistance aux antibiotiques en limitant les contaminations, contrôlant l'usage des antibiotiques et en menant des campagnes de prévention.
- Limiter la propagation des épidémies en réexaminant perpétuellement la composition des vaccins afin de les adapter à l'évolution rapide des virus.

Activité 4. L'impact des pratiques agricoles sur la biodiversité

• **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

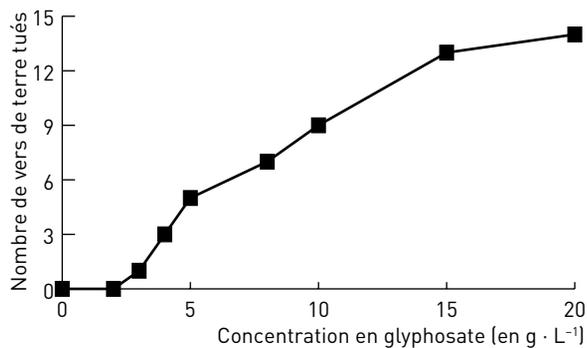
• Commentaires sur l'activité

L'objectif de cette activité est de montrer que les mécanismes de l'évolution permettent d'expliquer l'impact des pratiques agricoles modernes sur la biodiversité. Elle s'inscrit dans l'objectif général de formation « Identifier et comprendre les effets de la science sur l'environnement ». En effet, afin de pouvoir nourrir une humanité toujours plus nombreuse, dès le début des années 1950, l'agriculture moderne a fortement augmenté la productivité avec des pratiques agricoles intensives. Ceci a eu des conséquences sur la biodiversité : baisse de la biodiversité génétique et spécifique et apparition de ravageurs des cultures résistants aux produits phytosanitaires, ce qui fait que cette thématique représente un enjeu majeur en terme environnemental.

Cette activité se prête volontiers à un débat, variante pédagogique proposée, sur la question vive de société : comment les pratiques agricoles modernes peuvent-elles nourrir l'humanité tout en préservant la biodiversité ?

• **Corrigés du guide de travail**

1.



Évolution du nombre de vers de terre tués en fonction de la concentration en glyphosate.

2. • Impact des pratiques agricoles modernes sur la biodiversité spécifique :

– On constate, suite à la question 1, que plus la concentration en glyphosate (herbicide) augmente, plus le nombre de vers de terre tués est important. L'utilisation massive de produits phytosanitaires peut donc avoir un impact sur la disparition de cette espèce dans les sols des champs cultivés.

– Le liseron des haies est considéré comme une mauvaise herbe et les agriculteurs peuvent avoir recours à des produits phytosanitaires pour l'éliminer, or le sphynx du liseron est un papillon qui ne peut vivre qu'en présence du liseron des haies. De plus, pour laisser passer les machines agricoles sur de grandes surfaces, la pratique de la monoculture intensive implique la destruction d'habitats comme les haies, donc du liseron des haies. La destruction de cette plante peut donc entraîner la disparition de cette espèce de papillon (doc 2).

• Impact des pratiques agricoles modernes sur la biodiversité génétique :

– La pratique intensive de la monoculture implique de cultiver à grande échelle la même variété de plante avec des spécimens tous identiques génétiquement (doc 2).

– Cette sélection de variétés les plus productives, comme la domestication et la sélection des races les plus productives dans les élevages intensifs, fait baisser la biodiversité génétique. Par rapport au début du XX^e siècle, 75 % de la diversité génétique des plantes cultivées a été

perdue ainsi que 50 % des races d'élevages. Sur les 50 % de races encore élevées, une grande partie est actuellement en danger de disparition (doc 1).

– Cette baisse de la variabilité génétique a des conséquences sur la fragilité des espèces élevées (et cultivées) : la race prim'Holstein est la plus élevée des vaches laitières en France car elle est très productive en lait. Au sein de la race, pour encore augmenter les rendements, la pratique de l'insémination artificielle des vaches avec les mêmes reproducteurs mâles très performants a encore fait baisser cette biodiversité génétique. Suite à cela, les vaches sont moins résistantes aux maladies, des anomalies génétiques sont apparues et leur fertilité a chuté (doc 1).

3. Les doryphores sont des insectes ravageurs des cultures de pommes de terre. Pour lutter contre ce ravageur, les agriculteurs ont eu massivement recours à l'utilisation d'insecticides à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle. Sur une population d'insectes, certains peuvent être naturellement résistants à un insecticide. L'insecticide tuera donc les insectes y étant sensibles mais pas ceux qui y sont naturellement résistants. Ces derniers, ainsi sélectionnés, se reproduiront et envahiront les champs.

Synthèse

Les pratiques agricoles modernes ont un impact sur la biodiversité génétique des espèces qu'elles exploitent : en sélectionnant les races ou variétés les plus productives, on assiste à la disparition de nombreuses races élevées ou de variétés cultivées. De plus au sein même des races ou variétés, on assiste à une baisse de la variabilité génétique les rendant plus fragiles, donc moins aptes à résister à l'attaque d'un agent pathogène ou à un changement de l'environnement.

Elles ont également un impact sur la biodiversité spécifique : la monoculture intensive, en détruisant les habitats afin de laisser passer les machines agricoles, provoque par exemple la disparition de nombreuses espèces d'insectes. Elle nécessite également l'utilisation de produits phytosanitaires qui provoquent la disparition d'espèces animales ou végétales vivant dans les champs mais aussi aux alentours. Leur utilisation favorise également le développement de ravageurs des cultures qui y sont résistants.

Se tester

p. 194

1. a. Faux b. Faux c. Vrai
2. 1) Contrainte de construction
2) Régression en cours
3) Compromis sélectif
4) Contrainte historique
3. a. Vrai b. Faux c. Faux
4. b

Travailler des compétences scientifiques

p. 195

6. Mettre en relation des données pour résoudre un problème

La perception des objets en fonction de leur distance nécessite une lentille (cristallin) plus ou moins bombée pour qu'une image nette se forme sur la rétine (doc 1). Dans le cas de l'espèce humaine, le cristallin peut se déformer en fonction de la distance de l'objet observé contrairement au requin qui possède un cristallin rigide. L'œil du requin a une forme asymétrique, la distance entre le cristallin et la rétine est plus courte pour les objets situés sous le requin et plus longue pour les objets situés au-dessus (doc 2).

Cette forme asymétrique permet donc au requin d'avoir deux modes d'observation en fonction de la distance des objets proches ou éloignés tout en ayant un cristallin rigide.

Remarque : dans l'œil des sélaciens, il existe aussi des muscles qui permettent de déplacer le cristallin pour modifier sa distance par rapport à la rétine.

Appliquer

p. 196-197

7. Les yeux composés des insectes

Les premiers insectes et leurs ancêtres possédaient des pigments photosensibles à la lumière. Des mutations ont affecté les structures au niveau des photorécepteurs qui fabriquent ces pigments. Quand elles ont amélioré la qualité de la vision, les insectes porteurs de ces mutations ont alors été mieux adaptés à leur milieu. De cet avantage résulte une sélection qui a favorisé une accumulation d'innovations au sein de l'organe visuel. Par

exemple, la présence d'une fovéa où l'image se forme de manière très nette et la vision binoculaire qui permet de mieux apprécier les distances ont favorisé les mantes religieuses pour capturer des proies mobiles. Ces innovations apparues au hasard ont donc été conservées chez ces insectes.

8. Le hoquet et le trajet du nerf phrénique

1. Le nerf phrénique dérive d'un nerf qui reliait chez nos ancêtres les branchies au cerveau. Le passage à la respiration aérienne s'est accompagné d'une modification du rôle de ce nerf qui innerve désormais le diaphragme situé sous les poumons. Il n'y a donc pas eu apparition d'un nouveau nerf, mais la modification de la fonction d'un nerf existant.

2. La modification d'un nerf existant est une contrainte historique.

9. La résistance des bactéries aux antibiotiques

1. En analysant la carte, on constate que c'est dans les pays européens où la consommation d'antibiotiques est la plus forte que l'on retrouve le plus de bactéries *Escherichia coli* résistantes aux antibiotiques. Il y a donc un lien de causalité entre la consommation d'antibiotiques et le développement de la résistance de cette bactérie.

2. Du fait du taux de mutations au sein des populations bactériennes, certaines conduisent, au hasard, à l'acquisition de la résistance à un antibiotique. En appliquant cet antibiotique sur une population bactérienne, seules les bactéries y étant sensibles seront tuées. Les bactéries résistantes vont survivre et se multiplier rapidement.

3. Pour lutter contre ce problème majeur de santé publique, des stratégies peuvent être mises en place : contrôler l'usage des antibiotiques, mener des campagnes de prévention, développer des règles d'hygiène pour limiter les contaminations.

10. Évolution et impact des pratiques agricoles sur la biodiversité : le blé

1. En analysant les diagrammes, on constate qu'en 1915 les variétés de pays et les variétés anciennes étaient quasiment les seules à être cultivées dans ce département. En 1950, au début de la révolution agricole, on note l'apparition des variétés

modernes. En 1970, on constate que seules les variétés modernes sont cultivées. En 2006, les variétés modernes constituent la majeure partie des variétés cultivées. Finalement, suite à la révolution agricole, la part des variétés modernes a supplanté les variétés de pays et anciennes.

2. Cette sélection des blés modernes au détriment des variétés de pays et anciennes pour la culture dans ce département représente une véritable diminution de la biodiversité génétique, on peut parler d'érosion génétique.

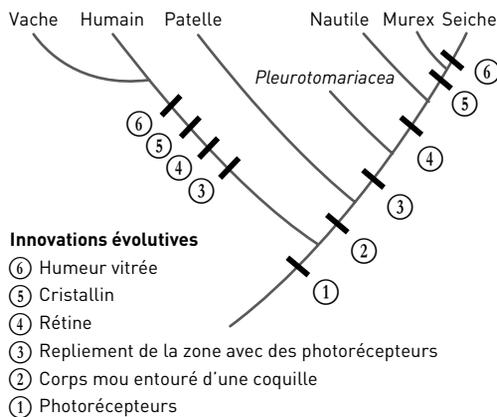
S'entraîner

p. 197-198

11. Le murex, un prédateur des fonds marins

1. On retrouve parmi les caractéristiques anatomiques de l'œil du murex les innovations évolutives « photorécepteurs », « repliement de la zone avec des photorécepteurs », « rétine » et « cristallin » mais pas celle de « l'humeur vitrée » et l'œil n'affleure pas à la surface de la peau comme chez la seiche.

2.



3. Le murex est un chasseur, il se déplace pour trouver ses proies qui sont des gastéropodes peu mobiles. Cela nécessite de distinguer des formes de manière assez précise sans pour autant nécessairement égaler la qualité visuelle de la seiche, qui chasse des proies rapides.

12. Le nerf laryngé gauche chez la girafe

1. À cause du rallongement du trajet du nerf, le message qui part du cerveau met cent fois plus de temps pour atteindre le larynx. On perd donc en efficacité car la principale caractéristique d'un

message nerveux est d'être rapide. De plus, ce rallongement génère une dépense énergétique supplémentaire.

2. Il s'agit d'une contrainte historique car ce nerf existait déjà chez les ancêtres des girafes. Mais il s'agit aussi d'une contrainte de construction puisque l'allongement du nerf est lié à l'existence de la crosse aortique qui est un obstacle pour la trajectoire de ce nerf. Ces deux types de contraintes sont souvent liés à des degrés variables.

3. Le nerf devait exister chez les ancêtres de la girafe dont le cou était plus court. Il devait même exister avant l'apparition de la crosse aortique chez les premiers vertébrés terrestres. L'apparition de la crosse aortique puis l'allongement du cou sont tous deux responsables de la longueur excessive du nerf laryngé gauche de la girafe.

13. Histoire de la vaccination et controverses

1. Les étapes de la démarche scientifique mise en œuvre par Jenner :

- Constat : les fermières régulièrement au contact de vaches atteintes par la « vaccine » ne contracte jamais la variole humaine.
- Hypothèse : le pus présent dans les pustules des fermières qui ont contracté la vaccine les protège de la variole.
- Expérience : il introduit chez James Phipps, un jeune garçon de huit ans, le contenu des pustules du bras d'une fermière qui avait contracté la vaccine bovine. Il lui injecte ensuite la forme humaine virulente de la variole.
- Résultat : le jeune garçon ne tombe pas malade.
- Conclusion : l'hypothèse de Jenner était bonne.

2. Cette caricature représente Jenner vaccinant une jeune femme effrayée, entourée par d'autres patients dont différentes parties du corps ont des caractéristiques bovines, minotaurisées. Cette caricature met en évidence une des controverses autour de la vaccination : les anti-vaccinalistes de l'époque craignent en effet l'introduction d'un liquide d'origine animal considéré comme un poison.

3. La compréhension du principe de la vaccination résulte d'une longue histoire collective. En effet, les nouveaux faits apportés par les travaux de Koch et Pasteur sur le rôle des microorganismes dans les maladies infectieuses ont permis, entre autres, de faire progresser les techniques médi-

cales, notamment par l'inoculation de microbes atténués.

14. Le hasard dans les grandes découvertes médicales

1. Fleming travaillait sur des cultures de staphylocoques qui sont des bactéries. En rentrant d'un voyage, il constate, alors que ce n'était pas son objectif de recherche, qu'une moisissure (le pénicillium) a contaminé une de ses cultures et qu'autour de la moisissure, les bactéries ont été tuées.
2. Selon Fleming, la disparition des colonies de staphylocoques à proximité de celles de pénicillium est due à une substance bactéricide produite par cette moisissure.
3. La découverte des antibiotiques résulte d'une histoire collective. En effet Fleming n'a pas réussi à isoler et stabiliser la substance bactéricide qu'il pensait être produite par le pénicillium. Il faudra attendre que deux autres scientifiques, Howard Florey et Ernst Chain, y parviennent, 10 ans après la découverte de Fleming, pour que le premier antibiotique, la pénicilline, soit purifié.

Vers le bac

p. 199

15. Respirer et se nourrir par le même conduit

Les ancêtres des mammifères vivaient dans l'eau, la nutrition se faisait par la bouche et la respiration par les branchies. Le passage d'une respiration aquatique par des branchies à une respiration aérienne par des poumons chez les ancêtres des mammifères a été rendu possible par le développement de structures anatomiques nouvelles à l'origine des poumons. Ces structures sont appa-

ruës suite à des variations successives de la structure du tube digestif. Cela a conduit à ce que l'air et les aliments empruntent un trajet commun de la bouche à l'épiglotte.

16. La lutte contre le mildiou de la pomme de terre

1. Une des causes de la famine qui a sévi en Irlande au XIX^e siècle est la destruction quasiment complète des cultures de pommes de terre, suite à leur infection par *Phytophthora infestans*, un agent pathogène responsable d'une maladie appelée le mildiou.
2. En analysant les différents tests de croissance des souches de *Phytophthora infestans* responsables du mildiou, on constate que :
 - la souche de *Phytophthora infestans* (1^{re} colonne) se développe normalement en absence de métalaxyl mais qu'en présence de ce produit phytosanitaire, sa croissance est inhibée (souche témoin);
 - la souche prélevée dans le champ de l'agriculteur (2^e colonne) se développe en absence comme en présence de métalaxyl.

La souche *Phytophthora infestans* prélevée dans le champ de cet agriculteur est résistante au métalaxyl, c'est pourquoi son champ de pommes de terre est atteint par le mildiou malgré son traitement au métalaxyl.

3. • Argument en faveur de l'utilisation massive de produits phytosanitaires : augmentation de la productivité agricole afin de nourrir l'humanité.
 - Argument contre l'utilisation massive de produits phytosanitaires : apparition d'espèces résistantes à ces produits qui deviennent inefficaces contre eux.

CHAPITRE 11 L'évolution humaine

I. Introduction

Programme

La paléanthropologie construit un récit scientifique de nos origines à partir des archives fossiles. La phylogénie permet d'étudier les relations de parenté entre les espèces actuelles et fossiles d'Hominidés.

Savoirs	Savoir-faire
<p>L'espèce humaine actuelle (<i>Homo sapiens</i>) fait partie du groupe des primates et est plus particulièrement apparentée aux grands singes avec lesquels elle partage des caractères morpho-anatomiques et des similitudes génétiques.</p> <p>C'est avec le chimpanzé qu'elle partage le plus récent ancêtre commun.</p>	<p>Analyser des matrices de comparaison de caractères morpho-anatomiques résultant d'innovations évolutives afin d'établir des liens de parenté et de construire un arbre phylogénétique.</p> <p>Mettre en relation la ressemblance génétique entre les espèces de primates et leur degré de parenté.</p>
<p>Des arguments scientifiques issus de l'analyse comparée de fossiles permettent de reconstituer l'histoire de nos origines.</p> <p>L'étude de fossiles datés de 3 à 7 millions d'années montre des innovations caractéristiques de la lignée humaine (bipedie prolongée, forme de la mandibule).</p> <p>Le genre <i>Homo</i> regroupe l'espèce humaine actuelle et des espèces fossiles qui se caractérisent notamment par le développement de la capacité crânienne. Plusieurs espèces humaines ont cohabité sur Terre.</p> <p>Certains caractères sont transmis de manière non génétique : microbiote, comportements appris dont la langue, les habitudes alimentaires, l'utilisation d'outils...</p>	<p>Positionner quelques espèces fossiles dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ou de leurs productions.</p> <p>Analyser des arguments scientifiques qui ont permis de préciser la parenté de <i>Homo sapiens</i> avec les autres <i>Homo</i>, et notamment la parenté éventuelle avec les Néandertaliens ou les Denisoviens.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>L'objectif n'est pas de conduire une approche exhaustive des fossiles et de leurs caractères biologiques, mais de présenter la démarche scientifique permettant de construire une histoire raisonnée de l'évolution humaine. Les notions de liens de parenté, étudiées au collège, sont mobilisées ; un accent particulier est mis sur l'importance de l'identification d'innovations évolutives communes.</p>	

Commentaires pédagogiques

Ce chapitre aborde une thématique « classique » des programmes de SVT de lycée mais dont l'actualité des découvertes conduit à une actualisation régulière des contenus. Au cycle 4, l'élève a pu argumenter, parmi d'autres exemples de grands groupes d'êtres vivants, l'histoire évolutive de l'être humain en comparant des caractères actuels avec ceux des espèces fossiles pour établir des liens de parenté. Il a ainsi pris conscience que l'histoire de l'évolution humaine peut être abordée avec les mêmes méthodes que celles des autres groupes d'êtres vivants. Ce chapitre se place en continuité avec ce principe, et vise à montrer que l'approche phylogénétique (c'est-à-dire l'application des méthodes scientifiques de la cladistique) permet de reconstituer de façon rationnelle et objective l'histoire évolutive de notre lignée. C'est également un chapitre qui se prête bien à la compréhension de la construction du savoir scientifique et où le poids des représentations et des croyances peut interférer avec l'interprétation des faits. Il paraît donc intéressant de replacer les découvertes de paléanthropologie dans la perspective de l'histoire des idées (activité 1). La reconstitution phylogénétique apparaît alors comme un moyen de lever les obstacles épistémologiques par l'introduction d'une méthode objective mais dont les résultats conservent le caractère réfutable propre à toute conclusion scientifique (en témoigne l'actualisation régulière des connaissances dans ce domaine à chaque nouvelle découverte de fossile). L'exemple de la controverse scientifique autour de la position systématique du fossile Toumaï proposée par Michel Brunet peut ainsi servir de support à cela (activité 3).

Le choix a été fait dans ce chapitre de construire progressivement l'histoire évolutive en partant du groupe des primates pour arriver progressivement à *Homo sapiens*. D'autres choix de progression sont bien entendu possibles.

Ce chapitre permet ainsi d'aborder deux des objectifs de l'Enseignement scientifique, « Comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration » et « Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques », puisque les élèves sont amenés à construire des arbres phylogénétiques en utilisant des données morphologiques et anatomiques ou moléculaires.

Compte tenu de l'objectif poursuivi, il pourrait être tentant d'aller vers une exhaustivité qui n'est pas attendue et qui se révélerait chronophage. Il ne s'agit pas de construire l'ensemble de l'arbre de parenté mais d'en donner les principaux repères et de comprendre les méthodes qui contribuent à sa construction afin que l'élève puisse ensuite mieux appréhender les découvertes régulières de nouveaux fossiles, souvent très médiatisées, qui permettront de corriger ou d'affiner cet arbre.

Toutefois il sera important de chercher à déconstruire la représentation erronée la plus classique de l'évolution humaine vue à travers un modèle hérité d'une vision hiérarchisée et graduelle du monde vivant, « l'échelle des êtres », formalisée par Aristote et dont nous sommes plus ou moins inconsciemment encore très imprégnés. La mise en évidence d'une « évolution mosaïque » et de la cohabitation de plusieurs espèces d'humains sont donc des incontournables (activités 3 et 4) qui conduisent à une représentation buissonnante de notre lignée à l'image de toute autre. D'autre part il est important de relier l'évolution au sein de notre lignée et celles des autres grands singes à l'action de la sélection naturelle, en s'appuyant éventuellement sur l'exemple du compromis évolutif à l'origine des difficultés obstétriques étudiées dans le chapitre 10. L'appui sur ce chapitre peut aussi permettre de montrer que notre évolution n'est pas stoppée (comme en témoigne par exemple la régression des dents de sagesse).

Enfin c'est aussi l'occasion de montrer que certains caractères peuvent être transmis de façon non génétique augmentant ainsi le potentiel de diversité au sein de notre lignée (activité 4).

Objectifs

- Analyser des matrices de comparaison et construire un arbre phylogénétique.
- Relier la ressemblance génétique entre les espèces de primates et leur degré de parenté.
- Reconstituer l'histoire de nos origines grâce à l'analyse comparée de fossiles.
- Préciser la parenté de *Homo sapiens* avec les autres espèces du genre *Homo*, et les liens de parenté au sein du genre *Homo*.

BIBLIOGRAPHIE

► Ouvrages de référence

- Sous la direction d'E. Heyer, *Une belle histoire de l'homme*, Flammarion (2015).
- Y. N. Harari, *Sapiens : une brève histoire de l'humanité*, Albin Michel (2015).
- A. Roberts, *Évolution : les origines de l'homme*, Delachaux et Niestlé (2012).
- D. Grimaud-Hervé, F. Serre et al., *Histoires d'ancêtres : la grande aventure de la préhistoire*, Errance (2015).
- Y. Coppens, *Aux origines de l'humanité, vol. 1 : De l'apparition de la vie à l'homme moderne*, Fayard (2001).
- H. de Lumley, *L'Homme premier*, Odile Jacob (2009).
- P. Picq, *Nouvelle histoire de l'Homme*, Perrin (2005).

► Sites Internet

- Le site Hominidés : <https://www.hominides.com/index.php>
- Le site Hominines : <http://hominines.portail-svt.com/>
- La lignée humaine : https://www.u-picardie.fr/beauchamp/conferences/La_lignee.html
- Visite virtuelle de la grotte de Lascaux : <https://archeologie.culture.fr/lascaux/fr>
- Visite virtuelle de la grotte Chauvet : <https://archeologie.culture.fr/chauvet/fr/visite-virtuelle>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 200

1. b
2. b
3. b
4. b

Activités p. 202-209

Activité 1. La place de l'espèce humaine parmi les primates

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques
- **Commentaires sur l'activité**

Il s'agira d'argumenter sur le fait que les méthodes de la phylogénie permettent d'établir de façon scientifique la place de l'espèce humaine au sein du monde vivant.

Le document 1 propose « la marche des idées » depuis Aristote jusqu'à nos jours avec la démarche de la phylogénie qui permet de retracer les étapes de l'évolution humaine.

Le document 2 permet de déterminer les innovations évolutives caractéristiques des primates.

La présentation en groupes emboîtés du document 3 permet de remobiliser les acquis du cycle 4.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Les grandes étapes des idées à propos de la place de l'espèce humaine dans le monde animal montrent que des faits scientifiques et des « croyances » vivaces se côtoient.

① Aristote propose une vision hiérarchisée de la nature.

② Cuvier nie l'origine animale de l'espèce humaine et réfute l'existence de restes d'hommes fossiles. Selon lui il n'y a donc pas de lien de parenté entre les espèces et l'espèce humaine. L'espèce humaine présente une origine divine.

③ Lamarck inclut l'origine animale de l'espèce humaine.

④ Geoffroy Saint-Hilaire, comme Lamarck, estime que les espèces se sont transformées et reconnaît une action lente de l'environnement sur l'évolution des espèces.

Remarque : même si de nos jours, Cuvier semble le plus loin d'une réalité scientifique, Lamarck et Geoffroy Saint-Hilaire tentent d'étayer leur théorie mais l'idée d'action lente de l'environnement reste à prouver. D'ailleurs, le transformisme de Lamarck n'est pas recevable scientifiquement.

⑤ Darwin considère l'espèce humaine comme une espèce animale soumise comme les autres aux mécanismes évolutifs : la sélection naturelle est le facteur essentiel de la transformation des espèces et donc de l'évolution.

La découverte d'hommes fossiles corrobore l'évolution des idées, et notamment le concept essentiel de Darwin qui avance que l'espèce humaine est soumise aux mécanismes évolutifs. La découverte d'hommes fossiles et leurs datations permettent de préciser la place de l'espèce humaine dans le règne animal et annoncent les méthodes de la phylogénétique.

⑥ Aujourd'hui, les méthodes qui permettent d'établir des relations de parenté entre les vertébrés sont applicables à l'espèce humaine et on retrace les étapes de l'évolution humaine depuis un ancêtre commun grâce à la phylogénie.

2. Des preuves scientifiques ont fait évoluer les idées : observation de fossiles, estimation de l'âge de la Terre, étude de fossiles humains, recherche de liens de parenté, etc.

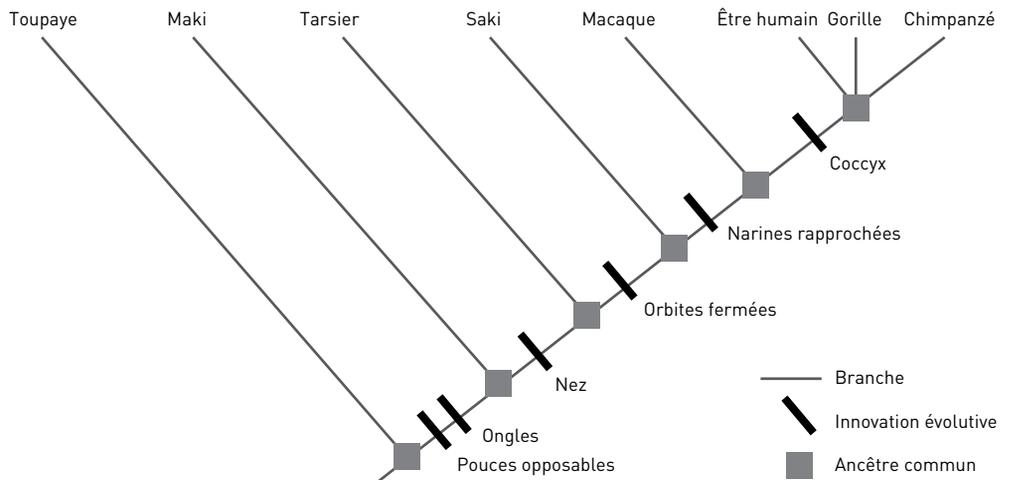
3. Le groupe des primates comprend les innovations suivantes :

- le pouce est opposable aux autres doigts, les primates sont donc dotés d'une main préhensible ;
- les doigts portent des ongles plats ;
- l'innervation tactile des doigts est importante ;
- les orbites larges et situées vers l'avant permettent une bonne perception du relief et des couleurs ;
- le cortex cérébral est bien développé.

L'espèce humaine peut donc être classée dans le groupe des primates puisqu'elle possède certains caractères partagés par l'ensemble du groupe.

4. Il est possible de justifier par l'approche phylogénétique l'appartenance de l'espèce humaine au groupe de primates. Des espèces qui partagent une innovation l'ont héritée d'un ancêtre commun : l'ancêtre commun des mammifères a des poils et des mamelles, l'ancêtre commun des primates a des ongles et des pouces sont opposables, l'ancêtre commun aux haplorrhiniens possède un nez et celui des simiiformes a des orbites fermées,

► Schéma de la synthèse de l'activité 1.



l'ancêtre commun des catarrhiniens a des narines rapprochées et celui des grands singes un coccyx. La comparaison des caractères morpho-anatomiques permet d'identifier des innovations et ainsi d'établir les liens de parenté de l'espèce humaine au sein des primates.

Synthèse

L'analyse de la classification en groupes emboîtés des primates montre qu'humain, gorille et chimpanzé possèdent un ancêtre commun plus récent que celui partagé avec le macaque. De même humain, gorille, chimpanzé et macaque possèdent un ancêtre commun plus récent que celui partagé avec le saki. Enfin, humain, gorille, chimpanzé, macaque et saki possèdent un ancêtre commun plus récent que celui partagé avec le tarsier.

Une phylogénie montre les relations de parenté évolutive entre les êtres vivants, elle est réalisée par comparaison d'innovations évolutives. Un arbre phylogénétique représente donc la parenté entre les êtres vivants, ainsi sa construction permet de déterminer la proximité évolutive entre les espèces.

Des espèces partageant une innovation évolutive ont un ancêtre commun exclusif qui leur a transmis ce caractère. Les ancêtres communs se trouvent aux nœuds de l'arbre.

— Voir le schéma en haut de page. —

Activité 2. Les relations de parenté entre les humains et les grands singes

• **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• Commentaires sur l'activité

Une première approche phylogénétique du groupe des primates a permis de dégager le groupe des grands singes hominoïdes, on cherche à affiner la parenté entre l'humain et le chimpanzé au sein de ce groupe. Pour construire un récit scientifique de nos origines à partir des archives fossiles, les paléoanthropologues déterminent les innovations évolutives propres à l'espèce humaine. Tous les fossiles présentant au moins l'une des innovations propres à l'espèce humaine appartiennent à la lignée humaine.

La comparaison des caractéristiques de notre espèce et l'espèce animale actuelle la plus proche, le chimpanzé, permet de déterminer les innovations propres à la lignée humaine.

La matrice construite sur la base d'innovations évolutives révèle que l'homme, le gorille, le chimpanzé, le gibbon et l'orang-outan partagent les mêmes innovations évolutives (doc 1). La comparaison des caractères morpho-anatomiques mais aussi génétiques permet d'identifier des innovations et ainsi d'établir les liens de parenté de l'espèce humaine au sein des primates (doc 2).

Les squelettes complets du document 3 sont proposés dans une position coïncidant au mode de locomotion préférentiel des deux espèces : marche quadrupède en « knuckle-walking » pour le squelette de chimpanzé et bipédie prolongée pour l'humain. Le document 4 propose une comparaison partielle des caryotypes de l'espèce humaine et du chimpanzé. L'analyse des caryotypes se limite aux paires de chromosomes 2 à 6 et l'interprétation est réalisée avec les données du texte.

• **Corrigés du guide de travail**

1. La matrice proposée montre la nécessité de réaliser une comparaison génétique pour déterminer la phylogénie précise des grands singes. En effet, les cinq espèces présentent les mêmes innovations évolutives des caractères anatomiques, donc ces caractères ne permettent pas de préciser les degrés de parenté d'où l'utilité d'utiliser des données moléculaires.

La comparaison de la séquence du gène codant la synthèse de la NAD, une enzyme du métabolisme respiratoire présente chez tous les primates permet, en appliquant les méthodes phylogénétiques, la construction d'un arbre de parenté.

Un pourcentage d'identité inférieur à 40 % ne traduit pas une parenté moléculaire, or les pourcentages d'identité sont élevés et attestent d'une étroite parenté entre ces cinq espèces, elles possèdent toutes le gène de la NAD et avec des séquences assez proches pour avancer que ces gènes proviennent d'un gène ancestral possédé par un ancêtre commun plus ou moins récent de ces espèces.

Humain et chimpanzé possèdent les séquences les plus proches et ont donc été héritées de l'ancêtre le plus récent.

On peut montrer que de grandes similitudes existent entre les caryotypes de l'être humain et du chimpanzé, les différences s'expliquant principalement par des remaniements entre chromosomes.

2. La comparaison peut être réalisée sous la forme d'un tableau.

3. La comparaison des caractéristiques des squelettes de l'espèce humaine et du chimpanzé permet d'identifier des caractères propres à l'espèce humaine et donc de définir la lignée humaine. L'humain est adapté à une bipédie prolongée, cette capacité s'accompagne d'adaptations anatomiques.

Appartenir à la lignée humaine c'est présenter des particularités squelettiques adaptées à la bipédie prolongée : la colonne vertébrale présente quatre courbures ce qui facilite mécaniquement une posture redressée. Le trou occipital centré assure à la boîte crânienne un équilibre au sommet de la colonne vertébrale. Le bassin court et large ainsi que les fémurs convergents permettent le maintien de l'équilibre à chaque pas. Le pied, doté d'une voûte plantaire, d'un gros orteil vers l'avant et d'un talon épais, permet une propulsion efficace.

Une espèce qui présente une des innovations évolutives propres à l'espèce humaine appartient à la lignée humaine.

Synthèse

De grandes similitudes existent entre les caryotypes de l'être humain et du chimpanzé, les différences s'expliquant principalement par des remaniements entre chromosomes (doc 4). De plus, la comparaison de séquences nucléotidiques révèle de grandes similitudes. L'étude plus précise des données proposées dans le doc 2 est un fort argument, ainsi la comparaison de la séquence nucléotidique partielle du gène de la NAD permet de déterminer que c'est avec le chimpanzé que la proximité génétique est la plus grande. Ces fortes

Caractères	Espèce humaine	Chimpanzé
Capacité crânienne	1 500 cm ³	450 cm ³
Face	Aplatie	Prognathe
Mandibule	Parabolique	En « U »
Trou occipital	Centré	En arrière
Courbures de la colonne vertébrale	4	1
Bassin	Large et court	Étroit et long
Jambes	Plus longues que les bras	Plus courtes que les bras
Fémurs	Angle de 75° avec l'horizontale	Angle de 90° avec l'horizontale
Genoux	Rapprochés	Écartés
Voûte plantaire	Présente	Absente
Talons	Épais	Minces
Gros orteil	Vers l'avant	Opposable aux autres doigts

similitudes sont interprétées par le fait que l'espèce humaine et le chimpanzé partagent un ancêtre commun récent.

Activité 3. À la recherche de notre histoire évolutive

- **Objectif :** Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration
- **Commentaires sur l'activité**

Si on compare humain et chimpanzé, les points communs représentent les caractères primitifs spécifiques de l'ancêtre commun le plus proche.

Une première difficulté est celle de l'estimation de l'âge auquel les deux lignées se sont séparées : 4 à 5 millions d'années pour les généticiens (estimation du taux de mutation moyen mesuré chez l'être humain), au moins 8 Ma pour les paléontologues. Des découvertes exceptionnelles révèlent trois ensembles de fossiles africains présentant l'une des caractéristiques essentielles de la lignée humaine : la bipédie. Une seconde difficulté réside dans le choix du meilleur candidat : Toumaï, Orrorin ou Ardipithèque.

Un autre écueil est placé devant les scientifiques avec les mosaïques de populations et d'innovations évolutives identifiées entre -7 Ma et -3 Ma. Les registres locomoteurs des Australopithèques étaient complexes, combinant pour les plus anciens la bipédie au sol et les déplacements arboricoles, mais quelle innovation évolutive privilégier pour établir à coup sûr une phylogénie ?

Pour que la démarche de reconstitution de l'histoire évolutive de notre lignée soit scientifique et fasse l'objet d'un consensus il faut s'en tenir aux faits :

- présenter les restes fossiles tels qu'ils sont pour éviter les polémiques ;
- ne pas utiliser une reconstitution comme une preuve ;
- retracer la démarche permettant d'étayer une hypothèse ;
- mettre en avant l'étude pluridisciplinaire.

Ainsi la démarche phylogénétique est la plus fiable car basée sur l'observation de faits : les innovations évolutives. Mais la démarche s'expose à d'éventuelles nouvelles découvertes qui viennent préciser cette reconstitution historique et peuvent aussi déstabiliser des connaissances qu'on pensait bien établies.

Le document 1 montre que dans un passé que l'on

peut situer proche de la divergence supposée des deux lignées (-7, -6 Ma), des espèces apparentées aux grands singes mais qui diffèrent des humains et des chimpanzés actuels ont existé.

L'objectif du document 2 est de donner un exemple des polémiques qui émaillent souvent les avancées scientifiques en général et la reconstitution de notre phylogénie en particulier. La variante pédagogique proposée se focalise sur cet aspect.

La répartition chronologique proposée dans le document 3 a pour but de mettre en évidence les nombreuses cohabitations d'hominidés de -7 à -3 millions d'années. Comme l'indique le programme officiel, l'objectif n'est pas de conduire une approche exhaustive des fossiles.

Le doc 4 montre que les registres locomoteurs des Australopithèques étaient complexes et qu'ils combinaient bipédie au sol déplacements arboricoles.

• Corrigés du guide de travail

1. Les innovations évolutives liées à la bipédie retrouvées chez Toumaï et Orrorin sont clairement signalées sur le doc 1. Le trou occipital est décalé vers l'avant pour Toumaï et le col du fémur d'Orrorin est allongé et affiné comme chez les grands singes bipèdes.

Ces constatations sont à relier avec la recherche de l'ancêtre commun le plus récent de la lignée humaine et de la lignée conduisant au chimpanzé notamment : cet ancêtre commun doit présenter un répertoire locomoteur incluant la bipédie.

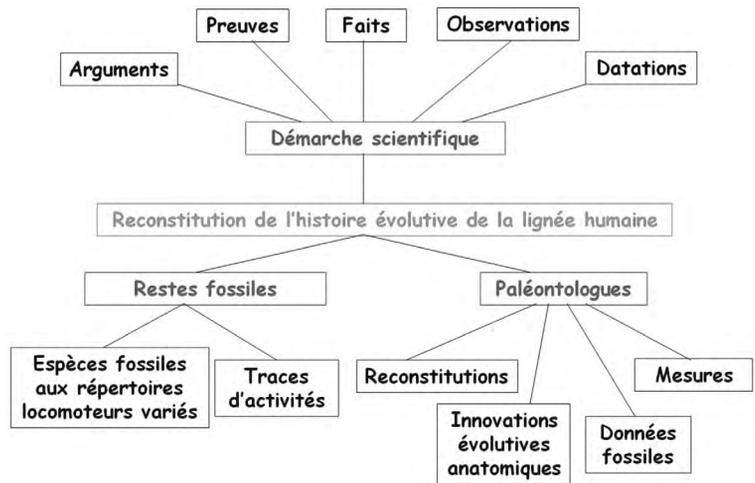
Remarque : il faut être vigilant dans la démarche de recherche de l'ancêtre commun le plus présent, le risque est de ne se baser que sur ce critère de la bipédie pour privilégier tel ou tel candidat.

La quête d'un ancêtre commun impose d'observer les plus anciens représentants de la lignée humaine et du chimpanzé, le registre fossile étant incomplet (doc 2) il est compliqué et hasardeux de considérer un fossile comme cet ancêtre commun le plus récent.

2. L'exploitation des docs 3 et 4 permet de justifier les termes de mosaïque de populations et de mosaïque d'innovations évolutives.

La chronologie donnée dans le doc 3 montre des cohabitations successives d'Hominidés. Par exemple *A. anamensis* et *A. afarensis* ont cohabité, ou encore les périodes durant lesquelles ont vécu *A. afarensis*, *A. bahrelgahzali* et *A. africanus* se chevauchent.

► Schéma de la synthèse de l'activité 3.



Le tableau du doc 4 indique qu'à une même période des espèces présentent des degrés différents d'évolution de certains caractères : une faible capacité crânienne avec une bipédie assez nette, ou au contraire une bipédie moins franche, mais une capacité crânienne plus élevée, un prognathisme marqué associé à une bipédie très évoluée, etc. C'est bien une mosaïque d'innovations évolutives que l'on retrouve de - 7 à - 3 millions d'années.

Ainsi des espèces ont évolué à des vitesses différentes, constituant une mosaïque d'innovations évolutives, et ont cohabité sur de longues périodes formant des mosaïques de populations.

Remarque : le cas *A. bahrelgahzali* est révélateur des conclusions trop rapides à partir de peu d'indices. En effet, la forme de la mandibule peut être une convergence morphologique, c'est donc un caractère qu'il est hasardeux d'utiliser pour établir un lien de parenté.

3. La reconstruction de l'histoire évolutive de la lignée humaine à partir des fossiles est complexe.

Sahelanthropus et *Orrorin*, [espèces fossiles aux répertoires locomoteurs variés, combinant aptitudes bipèdes et arboricoles], restent bien difficiles à placer dans notre arbre phylogénétique par les paléanthropologues. À noter que la rareté des restes fossiles accentue encore les difficultés.

Des fossiles découverts dans des couches plus anciennes sont dotés d'innovations évolutives anatomiques plus « jeunes ». D'autres fossiles présentent des caractéristiques anatomiques plus éloignées de la lignée humaine pour certains caractères telles que la capacité crânienne ou la forme de la mandibule et plus proches des nôtres

par d'autres traits comme le trou occipital ou le fémur. Cette mosaïque de caractères ancestraux et d'innovations évolutives complique la reconstitution de notre histoire évolutive.

Il est illusoire d'établir une succession linéaire d'un « ancêtre » à l'autre, et c'est une vision buissonnante de l'évolution humaine qui s'impose aux scientifiques.

Pour être fiable, scientifique et donc indiscutable, la démarche du paléanthropologue est basée sur les faits. L'analyse phylogénétique fondée sur des innovations observables apporte des preuves, des arguments, ce qui est la base de toute démarche scientifique.

Synthèse

— Voir le schéma en haut de page. —

Activité 4. Les relations de parenté au sein du genre *Homo*

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

- **Commentaires sur l'activité**

Il s'agit de démontrer comment, à partir de l'étude des fossiles et des humains actuels, il est possible de dégager des particularités propres au genre *Homo*. On montrera que cette définition du genre repose sur une combinaison d'innovations évolutives. Notamment, concernant le squelette crânien et postcrânien, les caractéristiques des représentants du genre *Homo* sont nombreuses. On exploitera de plus les pratiques culturelles même s'il est important d'ajouter que la maîtrise des outils n'est pas uniquement le propre des représentants du genre *Homo*. Le recours aux données génétiques

pour affiner la phylogénie au sein du genre *Homo* sera établi avec l'exemple des Dénisoviens.

De plus, un aperçu non exhaustif de l'histoire évolutive du genre *Homo* est proposé. Cette histoire est caractérisée par une succession et une coexistence de nombreuses espèces, ce qui vient compléter l'activité 3 précédente.

Une reconstitution précise de la phylogénie du genre *Homo* (et de la lignée humaine en général), est difficile, voire impossible, en raison des difficultés d'étude des fossiles. Considérer qu'un fossile est à coup sûr l'ancêtre d'un autre relève d'un pari hasardeux !

Le choix pédagogique conduit à proposer une chronologie exclusive du groupe *Homo* dans le doc 1. Cependant, pour plus d'exactitude scientifique, cette chronologie peut être complétée avec le groupe des Paranthropes.

Des cohabitations d'espèces sont aisément mises en évidence.

L'exploitation des valeurs des capacités crâniennes de quelques Hominidés apporte un argument pour le regroupement de certaines espèces au sein du genre *Homo* (doc 2).

Un aspect fondamental de l'histoire évolutive du genre *Homo* concerne les activités culturelles. Différents textes assortis de citations du paléanthropologue Henry de Lumley apportent quelques informations clés au sujet des diverses productions et activités culturelles caractérisant le genre *Homo*.

Des données génétiques récentes éclairent d'un jour nouveau l'établissement de parentés au sein de notre phylogénie (encart doc 1). On sait que l'histoire de la lignée est buissonnante, avec des rameaux qui apparaissent et d'autres qui disparaissent. On découvre grâce aux données de la génétique que plusieurs espèces ont pu s'hybrider et disséminer quelques morceaux d'ADN.

• Corrigés du guide de travail

1. C'est grâce aux données génétiques recueillies que l'on peut préciser les parentés au sein de notre phylogénie. L'analyse du génome de fragments osseux découverts a démontré qu'une jeune femme décédée il y a environ 90 000 ans était à moitié néandertalienne et à moitié dénisovienne, donc un hybride. Ceci suggère que la reproduction entre différents hominidés était probablement plus répandue que ce qu'on envisageait et permet de mettre en évidence une proximité génétique importante entre Néandertals et Dénisoviens.

3 à 5 % de l'ADN d'*Homo sapiens* tels que les Mélanésiens ou les Aborigènes provenant de Dénisoviens, la parenté est donc établie entre les deux espèces.

Pour les espèces du genre *Homo*, comme pour toute espèce, il n'est pas toujours facile de définir une espèce : finalement les Dénisoviens constituent-ils vraiment une nouvelle espèce ?

2. Il s'agit de justifier un regroupement de certaines espèces dans le genre *Homo* en comparant la capacité crânienne des hominidés. Le tableau du doc 2, directement ou par l'intermédiaire d'un tableur, permet de proposer le regroupement attendu.

En 7 millions d'années, la capacité crânienne et donc la taille du cerveau ont été multiplié par quatre. On voit une rupture nette entre les Australopithèques et les Paranthropes d'une part, et les représentants du genre *Homo* d'autre part. Chez les premiers, les plus anciens hominidés, la capacité crânienne ne dépasse pas les 600 cm³ : *Australopithecus anamensis*, daté de 4,2 à 3,9 Ma, présente une capacité crânienne de 370 cm³. La capacité crânienne de *Paranthropus aethiopicus*, daté de 2,7 à 2,3 Ma, est estimée à 420 cm³. Chez les *Homo*, cette capacité va de 550 cm³ à 1 750 cm³. *Homo habilis*, le plus ancien représentant du genre *Homo*, daté de 2,4 à 1,6 Ma, montre une capacité crânienne située entre 550 et 680 cm³.

3. Confection d'outils, usage du feu, sépultures, art sont des caractères transmis de manière non génétique. Ces caractères sont le fruit d'un apprentissage.

Synthèse

— Voir le schéma en haut de page suivante. —

Se tester

p. 212

1. d

2. L'espèce humaine et le chimpanzé partagent de nombreuses **innovations évolutives anatomiques** : pouces opposables, ongles, nez, orbites fermées, narines rapprochées, coccyx.

3. c

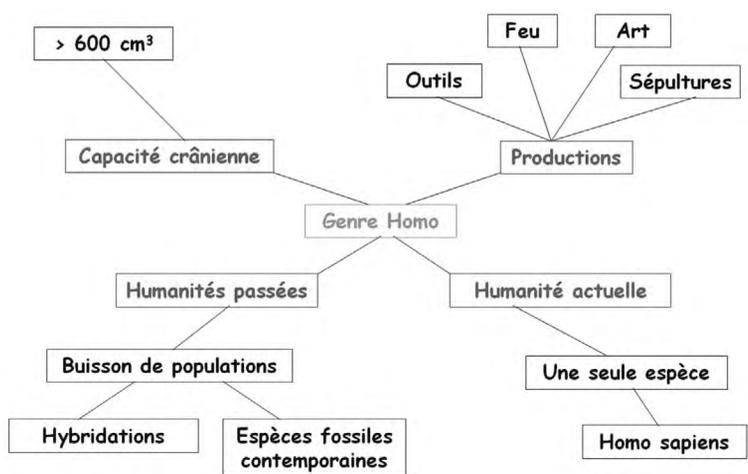
4. c

5. d

6. Arbre 1

7. Les gènes de l'espèce humaine et du chimpanzé présentent **peu de** différences de séquences.

► Schéma de la synthèse de l'activité 4.



Travailler des compétences scientifiques p. 213

9. Construire une argumentation scientifique

Des particularités squelettiques adaptées à la bipédie prolongée permettent de déterminer l'appartenance à la lignée humaine.

Le document 1 permet d'identifier certaines innovations crâniennes et post-crâniennes (bassins et fémurs) par comparaison d'*Homo sapiens* et du chimpanzé, ce dernier n'appartenant donc pas à cette lignée.

On observe chez l'espèce humaine : une capacité crânienne importante de 1 500 cm³, une face aplatie, un front et pas de crocs. Le bassin est court et évasé, les fémurs sont inclinés alors que chez le chimpanzé on observe un bassin allongé et étroit ainsi que des fémurs droits.

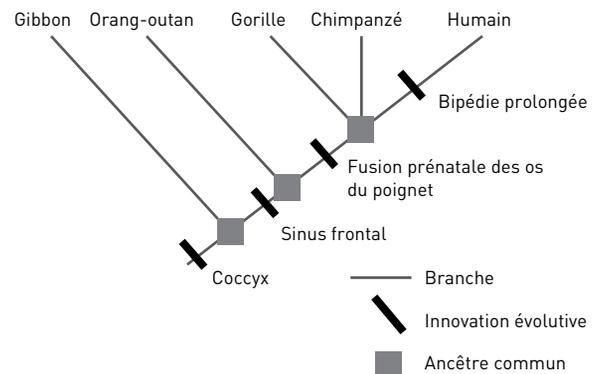
On observe chez l'adolescent du Turkana : une capacité crânienne de 900 cm³, largement supérieure à celle observée chez le chimpanzé, de plus le prognathisme est faible. Le bassin est court et évasé, les fémurs sont longs et inclinés comme chez *Homo sapiens* : ce sont des innovations évolutives liées à la bipédie.

L'adolescent du Turkana présente donc des innovations évolutives permettant de déduire qu'il est bipède, sa capacité crânienne est caractéristique du genre *Homo* : on peut conclure qu'il appartient à la lignée humaine.

Appliquer p. 214

10. Les caractères morpho-anatomiques des grands singes

Un arbre phylogénétique représente la parenté entre les êtres vivants, ainsi sa construction permet de déterminer la proximité évolutive entre les espèces. On détermine la proximité entre deux espèces en déterminant les innovations évolutives partagées : ainsi, humain, gorille et chimpanzé partagent trois innovations et ont donc un ancêtre commun récent. C'est le même raisonnement pour les autres espèces de la matrice.



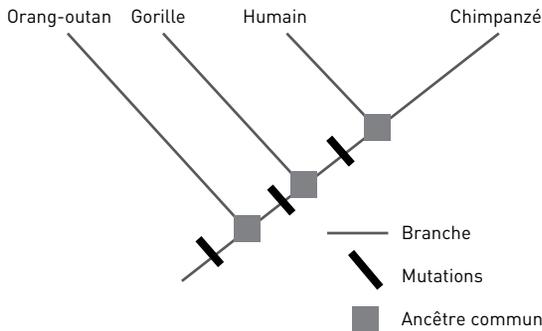
11. Une comparaison du gène BRCA-1

Les résultats observés montrent :
 - humain et chimpanzé : 65 différences dans la séquence de nucléotides du gène BRCA-1 ;
 - humain et gorille : 68 différences.

Interprétation : l'être humain partage un ancêtre commun plus proche avec le chimpanzé qu'avec le gorille.

On applique le même raisonnement pour le macaque.

On peut alors établir l'arbre phylogénétique des quatre espèces de primates à partir de la comparaison des séquences de nucléotides du gène BRCA-1.



S'entraîner

p. 214-215

12. Une représentation erronée de l'évolution de l'être humain

Cette image représente l'évolution humaine sous une forme linéaire : un singe courbé qui avance en se redressant et s'humanisant pour terminer en un *Homo sapiens* parfait bipède. On peut y envisager un alignement de cinq espèces d'hominidés : le chimpanzé donnant naissance à un Australopithèque donnant vie à *Homo habilis* qui à son tour engendre Néandertal en conduisant finalement à l'être humain moderne.

- Une des erreurs est de considérer que l'ancêtre d'*Homo sapiens* était un chimpanzé parfaitement identique à un chimpanzé actuel, ce qui équivaut à dire que notre ancêtre est un singe qui existe encore aujourd'hui. Nous savons que nous avons un ancêtre commun avec le chimpanzé dont l'âge est évalué vers -6, -7 millions d'années. Même s'il reste hypothétique, on peut reconstituer quelques-unes de ses caractéristiques à partir de l'observation des caractères partagés par les chimpanzés et l'espèce humaine. Ce dernier ancêtre commun (DAC) possède des caractères communs à l'humain et au chimpanzé mais il ne ressemble ni à l'un ni à l'autre : il a évolué vers deux lignées, celle des chimpanzés et celle des humains. En aucun cas l'être humain ne descend du chimpanzé !

- Une inexactitude supplémentaire est d'imaginer un chemin unique de l'évolution humaine. Chaque ancêtre à un descendant, puis un autre, suivi d'un autre... jusqu'à l'humain moderne.

L'étude des restes fossiles montre que de nombreuses cohabitations d'hominidés se sont succédé au cours de 7 derniers millions d'années. On montre clairement l'existence d'humanités qui se sont côtoyées. Notre histoire ne peut donc pas être lue comme une succession d'individus conduisant à *Homo sapiens*.

- Une autre faute est de penser que les caractères ancestraux évoluent de façon synchrone pour aboutir, au même rythme, aux innovations évolutives caractéristiques de l'humain moderne. L'étude des archives géologiques a démontré que sur une même période des espèces ont présenté des degrés différents d'évolution de certains caractères : une faible capacité crânienne avec une bipédie assez nette, ou au contraire une bipédie moins franche, mais une capacité crânienne plus élevée, un prognathisme marqué associé à une bipédie très évoluée... C'est une mosaïque d'innovations évolutives que l'on retrouve depuis 7 millions d'années.

- Une autre erreur est d'imaginer que l'être humain se redresse pour marcher. La représentation montre un chimpanzé qui se redresse pour finir en humain parfaitement bipède : les ancêtres de l'être humain marchaient à quatre pattes ! Nous connaissons plusieurs fossiles anciens qui montrent que des hominidés présentaient des bipédies spécifiques : Toumaï (7 Ma), Orrorin (6 Ma)... Cependant la bipédie de ces hominidés est encore discutée par les paléanthropologues. Il est de plus probable que le DAC devait présenter une bipédie imparfaite assortie d'adaptations à l'arboricolisme.

- Finalement ce schéma présentant une vision graduelle et linéaire de l'évolution de la lignée humaine ne résiste pas à l'épreuve d'une argumentation scientifique.

13. La place d'*Homo naledi* au sein de la lignée humaine

Les caractéristiques squelettiques montrent une mosaïque de caractères ancestraux, de type Australopithèque, et d'innovations évolutives typiques du genre *Homo*.

Homo naledi appartient incontestablement à la lignée humaine, mais la question est de savoir si sa position phylogénétique est plus proche des Australopithèques ou plus proche des Homos.

Des caractères ancestraux de type Australopithèque :

- des épaules permettant l'escalade ;
- une capacité crânienne entre 465 et 560 cm³ ;
- des doigts recourbés attestant d'une vie en partie arboricole ;
- un bassin évasé mais moins profond que chez les humains modernes.

Des innovations évolutives de type *Homo* :

- une face réduite sans prognathisme ;
- une mandibule parabolique ;
- un poignet et un pouce autorisant l'utilisation d'outils ;
- des jambes longues, fortes attaches musculaires comparables à celle d'un bipède moderne ;
- des pieds avec une voûte plantaire assurant une foulée efficace et une bipédie prolongée.

On peut à ce stade résumer ce portrait en exploitant le doc « La place de l'espèce humaine parmi les primates » p 211 : cinq caractères rapprochent *Homo naledi* du genre *Australopithecus* et quatre caractères rapprochent *Homo naledi* du genre *Homo*. Cette mosaïque de caractères rend difficile l'établissement d'une position phylogénétique pour *Homo naledi* dans le groupe des grands singes.

La datation, entre 236 000 et 335 000 ans, semble confirmer la proximité avec le genre *Homo*. Cependant, sa capacité crânienne le rapproche d'*Homo habilis* voire des Australopithèques, alors que sa bipédie révélerait une proximité avec *Homo erectus*.

D'autres données seraient nécessaires pour pouvoir trancher.

14. *Australopithecus sediba*, une mosaïque de caractères

Chez *Australopithecus sediba* on peut observer :

- un crâne qui présente des « bourrelets » au-dessus des orbites, un prognathisme, une mandibule robuste et une capacité crânienne de 420 cm³, constituant des caractères ancestraux ;
- un pouce long et musclé, qui aurait permis la fabrication d'outils ;

- un poignet attestant d'une dextérité moderne ;
- une flexion de la main, caractère ancestral révélateur d'un répertoire locomoteur arboricole ;
- une articulation des doigts sur le poignet comparable à celle des Australopithèques.

Ce mélange de caractères ancestraux et d'innovations évolutives rencontrés chez *Australopithecus sediba* constitue bien une mosaïque.

Les fossiles permettent de dater *A. sediba* aux environs de 2 millions d'années, soit 1 million d'années après *Australopithecus afarensis* (la fameuse Lucy) et le situe comme contemporain d'*Homo habilis*, le premier *Homo*.

On peut remarquer chez *Australopithecus sediba* un mélange de caractéristiques le rapprochant des premiers représentants de la lignée *Homo*, mais aussi des Australopithèques en particulier par sa faible capacité crânienne : on comprend les difficultés rencontrées par les scientifiques pour établir la position phylogénétique de ce fossile.

L'étude des fossiles de *A. sediba* permet aussi de mettre en garde quant à des conclusions parfois trop hâtives à partir de restes trop fragmentaires.

Vers le bac

p. 216-217

15. Des caractères transmis de manière non génétique

1. Les gènes ne sont pas les seuls caractères du genre *Homo* à être transmissibles, l'espèce humaine peut se diversifier par des moyens non génétiques.

L'étude de l'abondance de bactéries du microbiote humain révèle l'existence de trois types de répartition du microbiote digestif : un type à *Bactéroides* dominantes, un autre à *Prevotella* et un troisième à *Ruminococcus*.

Au moment de sa naissance, le bébé est exposé aux microbiotes vaginal et intestinal de la mère. C'est donc par contact direct, le plus souvent, qu'est réalisée cette transmission qui permet une protection vis-à-vis des infections par d'autres microbes.

Le travail des linguistes montre une évolution différente des langues actuelles à partir d'une même langue primitive. Notamment, l'étude des relations de parenté entre les différentes langues romanes montre une origine latine. Puis, en fonction de la

géographie, on note une diversité des langues actuelles transmises par apprentissage.

L'étude de la transmission et de la diversité des habitudes alimentaires démontre le rôle capital des facteurs socioculturels : goûts, croyances, etc. Le plus souvent transmises par nos parents, les habitudes alimentaires sont donc aussi une source de diversité des phénotypes de l'espèce humaine.

2. On peut alors supposer que la catégorie de type de microbiote (une différence de phénotype) conditionne une résistance différente aux éventuelles infections.

Les langues constituent une diversité phénotypique, déterminant en particulier la constitution des couples d'*Homo sapiens* et ainsi la sélection sexuelle.

De plus, nous savons que la nature des aliments consommés est à mettre en corrélation avec l'état de santé des individus.

Composition du microbiote intestinal, apprentissage de la langue, habitudes alimentaires, cette diversité transmise de manière non génétique, modifiant la valeur sélective des individus, donne ainsi prise aux mécanismes de l'évolution.

16. Néandertal réhabilité

1. • 1856 : la découverte de Néandertal

Les restes sont interprétés comme ceux d'un représentant de peuples primitifs. C'est donc une interprétation historique qui est faite et non pré-historique.

• 1908 : l'homme de la Chapelle-aux-Saints

La découverte d'un squelette ne modifie pas la représentation de Néandertal. Les journaux présentent un individu totalement simiesque, hirsute, muni d'une massue. C'est donc l'image d'un primate complètement primitif qui est véhiculée auprès du grand public.

• 1960 : des ossements sont exhumés en Europe occidentale. L'interprétation des restes nombreux

n'est absolument pas phylogénétique ! Les scientifiques insistent sur son caractère primitif et en font un maillon entre le singe et l'être humain, plus proche du premier que du second. La vision de l'histoire de la lignée humaine est linéaire, les paléontologues de l'époque sont à la recherche du « chaînon manquant » entre l'humain et le singe.

• 2018 : Néandertal au Musée de l'homme

Elisabeth Daynès réalise une reconstitution anatomique qui s'appuie sur les travaux des scientifiques. La reconstitution d'une femme néandertalienne proposée au grand public est très « humaine » : nous sommes aujourd'hui loin de la représentation du XIX^e.

2. Chez *Homo sapiens*, la forme du crâne est arrondie, le front est bombé, les bourrelets au-dessus des orbites sont peu prononcés, la face est plate, le prognathisme est absent et il y a un menton.

Chez Néandertal, le crâne est étiré vers l'arrière, le front est plat, les bourrelets au-dessus des orbites sont très prononcés, on note un fort prognathisme, la dentition large et épaisse, il n'y a pas de menton.

Grâce aux données squelettiques, crâniens et poste crânien, le portrait de Néandertal est construit scientifiquement.

3. D'aspect trapu, la silhouette de Néandertal est proche de la nôtre. Le façonnage d'outils révèle un homme de Néandertal doué d'une intelligence remarquable. Les rites funéraires attestent d'une capacité d'abstraction comparable à celle de *Homo sapiens*.

Les données génétiques confirment la grande proximité avec *Homo sapiens*.

Les premières reconstitutions de Néandertal, peu scientifiques car pilotées par les croyances de l'époque, étaient très éloignées de la réalité. De nos jours, les reconstitutions sont basées sur des preuves scientifiques et réhabilitent un homme de Néandertal qui n'a pas encore livré tous ses secrets.

CHAPITRE 12 Les modèles démographiques

I. Introduction

Programme

Dans le cadre de l'étude de l'évolution des populations, il est important de prédire leur effectif futur mais aussi la manière dont vont évoluer les ressources qui leur sont nécessaires. Pour prédire l'évolution d'un système quelconque, les scientifiques utilisent des modèles mathématiques. La présentation de l'exemple historique de Malthus permet de mettre en œuvre cette démarche mathématique dans le cas discret (correspondant à une variation par paliers).

Savoirs	Savoir-faire
<p>Un modèle mathématique simple est le modèle linéaire.</p> <p>Une grandeur discrète u varie de manière linéaire en fonction d'un palier entier n si sa variation absolue $u(n+1) - u(n)$ est constante. Dans ce cas, les points $(n, u(n))$ sont situés sur une droite. La suite de terme général $u(n)$ est arithmétique.</p> <p>Dans la réalité, pour une population dont la variation absolue est presque constante d'un palier à l'autre, on peut ajuster le nuage de points qui la représente par une droite (modèle linéaire).</p>	<p>Exprimer $u(n)$ en fonction de $u(0)$ et n.</p> <p>Produire et interpréter des graphiques statistiques traduisant l'évolution d'effectif d'une population ou de ressources, notamment sous forme de nuages de points.</p> <p>À l'aide d'une calculatrice ou d'un tableur, ajuster un nuage de points par une droite et utiliser ce modèle linéaire pour effectuer des prévisions.</p>
<p>Le modèle linéaire est inadapté pour représenter l'évolution d'une grandeur dont la variation absolue change fortement d'un palier à l'autre.</p> <p>Une grandeur discrète u varie de manière exponentielle en fonction du palier entier n si sa variation absolue $u(n+1) - u(n)$ est proportionnelle à sa valeur courante $u(n)$. Dans ce cas, sa variation relative (ou taux de variation) est constante et la suite de terme général $u(n)$ est géométrique.</p> <p>Dans la réalité, pour une population dont le taux de variation est presque constant d'un palier à l'autre, on peut ajuster le nuage de points par un modèle exponentiel.</p> <p>Le modèle démographique de Malthus est un modèle exponentiel d'évolution de l'effectif de la population. Il prévoit que l'effectif de la population décroît vers 0 si le taux de mortalité est supérieur au taux de natalité et croît vers l'infini si le taux de natalité est supérieur au taux de mortalité.</p> <p>Si les prédictions du modèle de Malthus peuvent se révéler correctes sur un temps court, elles sont irréalistes sur un temps long, notamment en raison de l'insuffisance des ressources disponibles.</p> <p>Des modèles plus élaborés prévoient que la population mondiale atteindra environ 10 milliards d'humains en 2050.</p>	<p>Exprimer $u(n)$ en fonction de $u(0)$ et de n.</p> <p>À partir de données démographiques, calculer le taux de variation d'une population entre deux dates. Calculer l'effectif final d'une population à partir de son effectif initial, de son taux de natalité et de son taux de mortalité. Selon le modèle de Malthus, prédire l'effectif d'une population au bout de n années.</p> <p>À l'aide d'un tableur, d'une calculatrice ou d'une représentation graphique, calculer le temps de doublement d'une population sous l'hypothèse de croissance exponentielle.</p> <p>À partir de documents fournis, proposer un modèle de croissance de ressources alimentaires (par exemple la production mondiale de blé ou de riz) et la comparer à une croissance exponentielle. Comparer les valeurs fournies par un modèle à des données réelles afin de tester sa validité.</p>
<p>Prérequis et limites</p> <p>Différentes notions déjà étudiées sont mobilisées : fonctions affines, représentations graphiques de droites, fonction de variable entière et notation $u(n)$. La connaissance de la fonction exponentielle n'est pas exigible.</p>	

Commentaires pédagogiques

En dehors de la spécialité SVT, l'étude des populations et de leur dynamique est abordée en sciences essentiellement d'un point de vue écologique au cycle 4. Les élèves ont appris qu'une population animale voit son effectif se modifier par les naissances et les morts selon les conditions de reproduction, les relations alimentaires (prédations) et la disponibilité des ressources alimentaires. L'application à l'être humain et la modélisation mathématique demandée par ce chapitre représentent donc une nouveauté,

même si d'une certaine façon les concepts de bases (reproduction, ressources alimentaires) sont pour la plupart connus. L'objectif principal du chapitre est donc la modélisation mathématique des variations d'effectifs au sein des populations humaines. On se rapproche ainsi des pratiques rencontrées en sciences sociales. Les mathématiques sont utilisées comme un outil qui permet de valider des modèles et de faire des calculs de prédiction.

L'activité 1 permet de fixer le cadre général des concepts et des outils. Les notions mathématiques mises en jeu (pourcentages – taux d'évolution) ont été revues par tous les élèves en classe de seconde. Cette activité peut être proposée dans un objectif de remobilisation et réalisée dans le cadre du temps de travail personnel des élèves. Elle peut aussi servir de diagnostic sur la maîtrise des outils mathématiques usuels par les élèves.

La modélisation se fonde principalement sur des approches graphiques et l'introduction de la notion de suite présentée dans l'activité 2. La notion de suite est un acquis des élèves de terminale qui ont suivi l'enseignement de spécialité mathématiques en classe de première mais les notions à acquérir en Enseignement scientifique de terminale sont modestes par rapport au programme de spécialité de première. Le modèle linéaire est bien connu des élèves qui ont étudié les fonctions affines en classe de troisième et de seconde. Toutefois, la notion de droite de régression est nouvelle.

L'étude des controverses historiques portées notamment par Malthus, Quetelet ou Verhulst est une entrée pertinente qui permet de contextualiser la découverte du modèle exponentiel d'accroissement des populations. Ce modèle est présenté dans l'activité 3. Les outils mathématiques sont tout à fait abordables par tous les élèves qu'ils aient ou non suivi l'enseignement de spécialité mathématiques. C'est l'occasion d'en découvrir graphiquement la signification, d'autant qu'il s'agit d'un modèle fréquemment utilisé dans le langage courant.

L'activité 4 permet de comprendre les limites du modèle de Malthus et d'évoquer des modèles plus élaborés, sans faire intervenir de formules mathématiques, comme l'indique le programme. Il permet une approche historique qui séduira des publics plus littéraires.

Objectifs

- Exploiter et calculer des effectifs, des variations absolues ou des taux de variation.
- Effectuer des prédictions à l'aide d'une suite arithmétique ou d'une suite géométrique.
- Justifier une hypothèse de croissance linéaire ou exponentielle.
- Comparer des valeurs fournies par un modèle à des données réelles.
- Expliquer le modèle de Malthus et ses limites.

BIBLIOGRAPHIE

▮ Ouvrages de référence

- C. Henry, *Biologie des populations animales et végétales*, Dunod (2001).

▮ Sites Internet

- Les statistiques et études de l'Insee : <https://www.insee.fr/fr/statistiques>
- La population mondiale, selon l'INED : <https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/jeux/la-population-mondiale/>
- Des données chiffrées sur la production agricole mondiale : <https://www.indexmundi.com/agriculture/>
- Outil pédagogique des grandes tendances de la population mondiale : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/stats/0/2018/fr/1/carte/SP.POP.TOTL/x.html>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 218

1. a
2. a
3. c
4. c

Activités p. 220-227

Activité 1. Des outils pour caractériser une population

- **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

- **Commentaires sur l'activité**

Les démographes utilisent différents critères pour étudier les populations humaines. Cette activité permet de se familiariser avec les outils. Les prérequis mathématiques ont été vus au collège et revus en classe de seconde. Cette activité peut donc être réalisée dans un objectif de remobilisation et réalisée dans le cadre du temps de travail personnel des élèves. Elle peut aussi servir de diagnostic sur la maîtrise des outils mathématiques usuels par les élèves.

- **Corrigés du guide de travail**

1. a Entre 2010 et 2019, le nombre de naissances est supérieur au nombre de décès.

b. Cette différence ne suffit pas à expliquer l'augmentation de la population française.

Entre 2015 et 2016, la différence entre le nombre de naissances et le nombre de décès (solde naturel) est de 205 268 individus, mais la hausse de la population n'est que de 180 176 habitants.

2. a. Taux de natalité en 2016 :

$$\frac{783\,640}{66\,602\,645} \approx 11,8 \text{ ‰}$$

Taux de mortalité en 2016 :

$$\frac{593\,865}{66\,602\,645} \approx 8,9 \text{ ‰}$$

b. Solde naturel entre 2016 et 2017 :
 $783\,640 - 593\,865 = 189\,775$ individus

Taux de variation naturelle entre 2016 et

$$2017 : \frac{189\,775}{66\,602\,645} \approx 2,9 \text{ ‰}$$

C'est aussi la différence entre le taux de natalité et le taux de mortalité de 2016.

c. Taux de variation naturelle entre 2017 et 2018 :
 $2,4 \text{ ‰}$

Taux de variation naturelle entre 2018 et 2019 :
 $2,2 \text{ ‰}$

Les taux de variation naturelle sont en baisse sur la période 2016-2019.

3. Hausse de la population sur l'année 2017 :
 $116\,217$ individus

Solde naturel pour l'année 2017 : $163\,279$ individus

Solde migratoire pour l'année 2017 :

$$116\,217 - 163\,279 = -47\,062$$

Il y a plus de départs que d'arrivées sur le sol français pour l'année 2017.

4. Pour une population où il n'y aurait ni départs et ni arrivées, son effectif croît lorsque le nombre de naissances est supérieur au nombre de décès, c'est-à-dire quand le solde naturel est positif.

Son effectif décroît lorsque le nombre de naissances est inférieur au nombre de décès, c'est-à-dire quand le solde naturel est négatif.

5. a. Nombre de naissances au Japon en 2017 :

$$126,8 \times \frac{7,6}{1\,000} \approx 0,964 \text{ million d'habitants.}$$

Nombre de décès au Japon en 2017 :

$$126,8 \times \frac{10,8}{1\,000} \approx 1,369 \text{ million d'habitants.}$$

b. Solde naturel sur l'année 2017 :

$$0,964 - 1,369 = -0,405 \text{ million d'habitants.}$$

Évolution de la population sur l'année 2017 :

$$126,5 - 126,8 = -0,3 \text{ million d'habitants.}$$

La baisse du solde naturel de 0,405 million d'habitants est supérieure à la baisse de la population qui est de l'ordre de 0,3 million d'habitants, donc le solde migratoire est positif. L'affirmation est vraie.

Synthèse

La population française augmente grâce à un solde naturel positif et ce malgré un solde migratoire négatif. La population japonaise décroît du fait d'un solde naturel négatif et malgré un solde migratoire positif.

Activité 2. Des outils pour modéliser et prédire : le modèle linéaire

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

La notion de modèle est essentielle pour pouvoir prédire l'évolution d'une population. Le modèle mathématique le plus simple est le modèle linéaire. C'est l'occasion d'introduire la notion de suite qui est seulement connue des élèves ayant suivi l'enseignement de mathématiques de spécialité en première. Le temps consacré à l'activité dépendra du profil de la classe. Le calcul de l'équation de la droite de régression n'est pas étudié en mathématiques. Les élèves s'appuieront sur le document 3 et la fiche maths pour la partie calcul.

• **Corrigés du guide de travail**

1. L'évolution de la population chinoise depuis 1960 se rapproche d'une progression arithmétique car la représentation graphique de sa population (doc 1) est un nuage de points presque alignés.

2. Évolution moyenne de la population entre 2010 et 2018 : $\frac{1\,393 - 1\,338}{8} \approx 6,9$ millions.

Ce qui est proche de l'affirmation de 7 millions par an.

3. a. $u(0)$ est égal à l'effectif de la population en 2010 soit 1 338 millions.

b. D'après le doc 2, $u(9) = u(0) + 9 \times r$ soit $u(9) = 1\,338 + 9 \times 7 = 1\,401$.

C'est l'effectif en millions de la population chinoise prévu par le modèle mathématique pour l'année 2019.

$u(10) = u(0) + 10 \times r = 1\,338 + 10 \times 7 = 1\,408$.

C'est l'effectif en millions de la population chinoise prévu par le modèle mathématique pour l'année 2020.

c. Prédiction de l'effectif de la population chinoise en 2050 : $u(40) = u(0) + 40 \times r = 1\,618$, soit 1 618 millions d'habitants.

4. Équation de la courbe de tendance : $y = 6,9333x - 12\,599$

Si $x = 2\,050$ alors $y = 6,9333 \times 2\,050 - 12\,599 = 1\,614,265$, soit une prédiction pour 2050 qui est cette fois de 1 614 millions d'habitants environ.

Synthèse

Dans les deux cas, on cherche à approximer l'évolution de la population chinoise par une droite. Cette méthode n'est applicable que si les points qui représentent graphiquement les effectifs de la population pour la période d'observation sont alignés ou presque alignés.

Activité 3. Des outils pour modéliser et prédire : le modèle exponentiel

• **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

• **Commentaires sur l'activité**

Pour une population dont le taux de variation est presque constant d'un palier à l'autre, on peut ajuster le nuage de points par un modèle exponentiel. Le modèle démographique de Malthus est un modèle exponentiel d'évolution de l'effectif de la population. Cette activité démarre par un point de vue historique et réinvestit la notion de suite mathématique. En complétant avec l'exercice 10, l'ensemble des savoir-faire associés aux suites géométriques est abordé à travers la modélisation de l'évolution de la population de Lagos.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Population aux États-Unis en 1815 : $3\,929\,214 \times 2 = 7\,858\,428$ millions d'habitants.

2. Dans le modèle de Malthus, la population est multipliée par deux tous les 25 ans. C'est une progression géométrique de raison 2, on peut donc parler de modèle exponentiel.

3. a. Si les effectifs d'une population augmentent de manière exponentielle, ils vont croître vers l'infini. Si les effectifs d'une population baissent de manière exponentielle, ils vont décroître vers zéro.

b. Lors d'une croissance exponentielle, le taux de natalité est supérieur au taux de mortalité contrairement à une décroissance exponentielle où le taux de natalité est inférieur au taux de mortalité.

4. Malthus utilise un modèle exponentiel pour décrire la croissance de la population mondiale et un modèle linéaire pour décrire la croissance des ressources. Il compare les coefficients multiplicateurs de la progression géométrique avec les variations absolues des ressources disponibles.

5. a. La représentation graphique de la production de riz au Nigéria peut être ajustée par une droite, on peut donc utiliser un modèle linéaire.

b. Le taux de variation de la population de Lagos est stable autour de 4,1 %. Son évolution peut être modélisée par une suite géométrique.

c. On choisit pour raison le coefficient multiplicateur : $1 + \frac{4,1}{100} = 1,041$.

6. a. $u(0) = 4,8$ et $q = 1,041$.
Donc $u(n) = u(0) \times q^n = 4,8 \times 1,041^n$.

b. $u(24) = 4,8 \times 1,041^{24} \approx 12,6$ millions d'habitants en 2014 selon la prédiction du modèle.

Le modèle est valable si on compare à l'effectif de la population de Lagos en 2014 (doc 4).

c. Pour 2030, $u(40) = 4,8 \times 1,041^{40} \approx 23,9$ millions d'habitants prévus par le modèle exponentiel.

La valeur est proche des 24,2 millions lisible sur le graphique.

Synthèse

Si on applique le principe de Malthus, la population de Lagos va croître vers l'infini contrairement aux ressources, comme le riz. La population de Lagos va croître plus vite que les ressources disponibles. On peut penser que le manque de ressources va influencer sur l'évolution de la population.

Activité 4. Vers des modèles plus élaborés

- **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

Les prédictions du modèle de Malthus peuvent se révéler correctes dans des situations particulières. Plus généralement, dans de nombreuses conditions, des modèles plus élaborés ont été nécessaires pour comprendre l'évolution des populations et prédire l'effectif des populations humaines dans les années 2050. Cette activité devrait permettre de comprendre comment s'élabore le savoir scientifique, via l'étude des modèles démographiques. Elle s'inscrira également dans le cadre « histoire, enjeux, débats » par la compréhension des controverses autour du malthusianisme lors de l'élaboration des modèles mathématiques d'accroissement des populations.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Malthus a établi le principe que la population humaine tend à croître en progression géométrique, de manière à se doubler tous les 25 ans. Verhulst pose le problème des ressources alimentaires notamment cultivées qui ne pourront pas augmenter comme la population. De ce fait, l'évolution de la population tendra à devenir de plus en plus stationnaire.

2. Par définition, le solde naturel d'une population est la différence entre le nombre de naissances et le nombre de décès enregistrés au cours d'une période donnée.

La courbe du solde naturel peut donc être construite en tout point par la différence entre le

taux de natalité et le taux de mortalité. De ce fait, l'analyse comparée des deux courbes représentant les taux de natalité et de mortalité permet de comprendre celle du solde naturel.

3. Lorsque l'on compare, au Nigéria, l'évolution de la population (croissance géométrique) et des ressources que peut produire le pays pour nourrir sa population (croissance arithmétique), les prévisions de Malthus se concrétisent. La première crise alimentaire apparaît dès 1965 (guerre du Biafra) et en 1990 la production alimentaire nigériane devient nettement déficitaire pour nourrir la population. Ce que n'avait pas prévu Malthus : les échanges entre les populations et plus généralement la multiplication des échanges commerciaux mondiaux. Dans le cas du Nigéria, le déficit alimentaire est couvert par les importations de produits alimentaires financées par l'exportation de matières premières. Le Nigéria détient les plus importantes réserves en pétrole du continent africain.

Malthus n'avait pas non plus prévu la transition démographique. On considère que toutes les populations du monde évolueront de la même façon mais à des rythmes différents. On distingue 4 phases :

- Phase 1 : la natalité et la mortalité sont très fortes.
- Phase 2 : les progrès de la médecine et de l'hygiène réduisent le taux de mortalité et augmentent l'espérance de vie. En contrepartie, le taux de natalité reste élevé ce qui a pour conséquence une très forte augmentation de la population.
- Phase 3 : la fécondité baisse, puisque l'espérance de vie augmente. La natalité diminue.
- Phase 4 : un équilibre final naturel entre la natalité et la mortalité se met en place.

La transition démographique aboutit alors naturellement sur une stabilisation démographique (les taux de mortalité et de natalité étant tous les deux faibles) adaptée aux ressources disponibles.

4. Verhulst dit « L'accroissement virtuel de la population trouve donc une limite dans l'étendue et la fertilité du pays, et la population tend, par conséquent, de plus en plus à devenir stationnaire. »

L'état stationnaire est atteint avec « le scénario moyen » où le taux de fécondité est établi à 2 enfants par femme. C'est d'ailleurs sur ce scénario que s'appuient la plupart des organismes

démographiques officiels (dont celui de l'ONU) pour prédire une population mondiale à 10 milliards d'êtres humains en 2050.

Le scénario haut correspond à une croissance démographique de type malthusienne, géométrique avec $q > 1$.

Le scénario bas correspond à une croissance démographique de type malthusienne, géométrique avec $0 < q < 1$. Il correspond à une révolution démographique qui prévoit un effondrement démographique, après une phase de vieillissement de la population (voir le cas du Japon dans l'activité 1).

Synthèse

Au début du XIX^e siècle, l'économiste Malthus pose les prémisses de l'étude de l'évolution des populations humaines en corrélation avec les ressources disponibles. Il utilise pour ce faire des outils mathématiques comme les suites géométrique (pour les populations) et arithmétique (pour les ressources). Durant le XIX^e puis le XX^e siècle, ces outils sont améliorés par des mathématiciens comme Verhulst. Des concepts nouveaux comme celui de la transition démographique sont également introduits pour ajuster ces modèles. Ces derniers sont alors utilisés dans l'établissement de scénarios sur lesquels s'appuient la plupart des organismes démographiques officiels (dont celui de l'ONU) pour prédire une population mondiale à 10 milliards d'êtres humains en 2050.

Ainsi, les débats liés à l'évolution des populations et de leurs ressources mis en place dès le début du XIX^e siècle ont été des moteurs visant à améliorer les modèles prédictifs utilisés actuellement par les gouvernements et organismes internationaux.

Se tester

p. 230

1. a. Faux b. Vrai c. Faux d. Vrai
2. a. Vrai b. Faux c. Vrai d. Vrai
3. a. Vrai b. Vrai c. Faux d. Vrai
4. d
5. a et 2; b et 1

Travailler des compétences scientifiques

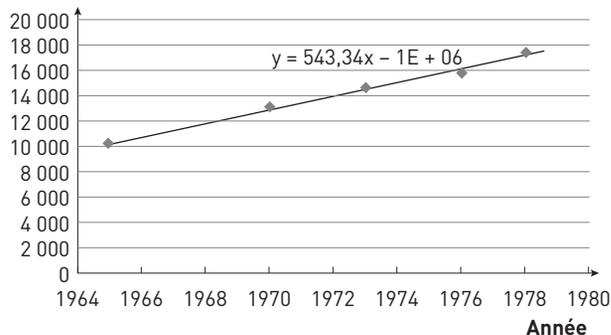
p. 231

7. Comparer des modèles de croissance

La croissance de riz en Indonésie peut être ajustée par une droite. On peut donc utiliser le modèle linéaire.

Production de riz

(en milliers de tonnes)



Dans le texte, le taux d'évolution annuelle de la population est presque constant, on peut donc utiliser le modèle exponentiel.

En Indonésie, la population croît donc plus vite que les ressources disponibles.

Appliquer

p. 232

8. La conservation des espèces animales

1. Nombre de naissances en une année :

$$9\,000 \times \frac{8}{100} = 720$$

Nombre de décès en une année :

$$9\,000 \times \frac{5}{100} = 450$$

Nombre de rhinocéros en 2015 :

$$9\,000 - 450 + 720 = 9\,270$$

2. Hausse : $8 - 5 = 3\%$.

3. a. Avec un taux de variation constant, on utilise un modèle exponentiel :

$$9\,000 \times 1,03^6 \approx 10\,746 \text{ rhinocéros en 2020.}$$

b. Avec la baisse du braconnage, le taux de mortalité a diminué, on peut penser que le nombre de rhinocéros en 2020 est supérieur au calcul précédent.

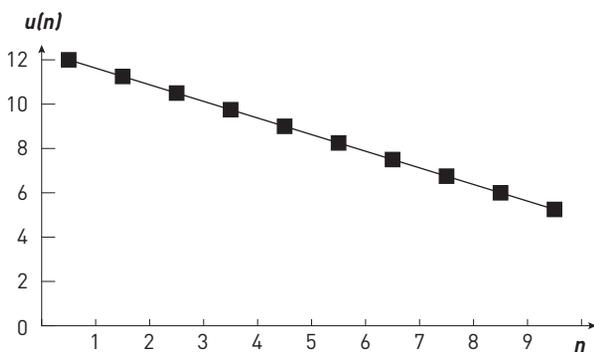
c. On est dans le cas d'un modèle malthusien. La population de rhinocéros va croître vers l'infini.

9. Le modèle linéaire – la suite arithmétique

1. Tableau complété : la raison est égale à $r = -0,75$.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u(n)$	12	11,25	10,5	9,75	9	8,25	7,5	6,75	6	5,25

2. Représentation graphique :



3. $u(n) = u(0) + n \times r = 12 - 0,75 n$

4. $u(16) = 12 - 0,75 \times 16 = 12 - 12 = 0$

10. Le modèle exponentiel – la suite géométrique

1. a. La suite géométrique a pour premier terme 4,8 et pour raison 1,041.

b. Le temps de doublement est l'année 2018 (pour $n = 18$).

2. a. $u(n) = 4,8 \times 1,041^n$.

b. On multiplie l'effectif initial par deux : $4,8 \times 2 = 9,6$, puis on vérifie que $u(17) < 9,6 < u(18)$.

11. La population parisienne

1. Taux de variation entre 2011 et 2018 :

$$\frac{2,193 - 2,25}{2,25} \approx -2,5 \%$$

Taux de variation entre 2018 et 2025 :

$$\frac{2,180 - 2,193}{2,193} \approx -0,6 \%$$

2. Taux de variation entre 2000 et 2011 :

$$\frac{2,250 - 2,13}{2,13} \approx 5,6 \%$$

3. Les modèles mathématiques ne peuvent pas s'appliquer entre 2000 et 2025 car la population croît avant de décroître. Après 2011, on ne peut ni envisager le modèle linéaire car les accroissements sur 7 ans sont différents ($-0,057 \neq -0,013$), ni le

modèle exponentiel car les taux d'accroissement sur 7 ans sont eux aussi différents ($-2,5 \neq -0,6$).

S'entraîner

p. 233-234

12. Le doublement de l'effectif d'une population

1. a. Effectif initial : $u(0) = 20$ millions d'habitants.

b. Effectif au bout de 10 ans : $u(10) = 20 \times 1,03^{10} \approx 26,9$ millions d'habitants.

2. a. Temps de doublement pour $n = 24$.

b. On multiplie l'effectif initial par deux : $20 \times 2 = 40$, puis on vérifie que $u(23) < 40 < u(24)$.

c. D'après le raisonnement de Malthus, la population devrait croître à l'infini.

13. Le problème d'Euler

1. $\frac{1}{30} \approx 0,33$. Tous les ans, la population croît de 3,3 % environ.

Le taux variation annuel est constant, donc la croissance est exponentielle.

2. On modélise le problème à l'aide d'une suite géométrique de 1^{er} terme $u(0) = 100\ 000$ et de raison $q = 1 + \frac{1}{30} = \frac{31}{30} \approx 1,033$.

3. On calcule alors $u(100) = 100\ 000 \times \left(\frac{31}{30}\right)^{100} \approx 2\ 654\ 874$ habitants au bout de 100 ans.

$\frac{u(100)}{100\ 000} = \left(\frac{31}{30}\right)^{100} \approx 26,5$. On retrouve bien le résultat énoncé par Euler.

14. Le Mali

1. Taux de variation entre 2011 et 2018 :

$$\frac{19\ 077\ 690 - 15\ 049\ 353}{15\ 049\ 353} \approx 26,8 \%$$

2. Le taux de variation annuel des effectifs est presque constant, on peut parler de croissance exponentielle pour la population malienne.

3. a. Moyenne des taux de variation :

$$\frac{27,27}{9} = 3,03 \%$$

b. Coefficient multiplicateur associé à la moyenne des taux : $1 + \frac{3,03}{100} \approx 1,03$.

c. $u(n) = 15\ 049\ 353 \times 1,03^n$

d. $u(8) = 15\ 049\ 353 \times 1,03^8 \approx 19\ 064\ 070$ habitants.

La prédiction du modèle exponentiel est proche de l'effectif pour 2018 donné par le tableau.

e. Prédiction pour 2025 :
 $u(15) = 15\,049\,353 \times 1,03^{15} \approx 23\,446\,401$ habitants.

15. L'hypothèse de Malthus

1. a. La suite de terme général $u(n)$ est géométrique de raison 1,02. La suite de terme général $v(n)$ est arithmétique de raison 400 000.

Donc : $u(n) = 8\,000\,000 \times 1,02^n$ et
 $v(n) = 10\,000\,000 + 400\,000n$.

b. Population anglaise en 1900 :
 $u(100) = 8\,000\,000 \times 1,02^{100} \approx 57\,957\,169$ habitants.

Nombre de personnes nourries en 1900 : $v(100) = 10\,000\,000 + 400\,000 \times 100 = 50\,000\,000$ habitants.

2. Déjà en 1900, l'agriculture anglaise ne permettait plus de nourrir la population anglaise.

$u(86) < v(86)$ mais $u(87) > v(87)$, donc à partir de 1887 (= 1 800 + 87), l'agriculture anglaise ne permettait plus de nourrir la population anglaise.

16. La Nouvelle-Zélande

1. La représentation graphique de la population (doc 1) est un nuage de points presque alignés.

2. Taux de variation entre 1991 à 2018 :
 $\frac{4\,885\,500 - 3\,495\,100}{3\,495\,100} \approx 39,8\%$

3. a. $u(27) = 3\,495\,100 + 27 \times r$.

b. Donc : $r = \frac{u(27) - 3\,495\,100}{27} = \frac{4\,885\,500 - 3\,495\,100}{27} \approx 51\,496$ arrondi à l'unité

c. $u(9) = 3\,495\,100 + 9 \times r = 3\,958\,564$. Le calcul est proche de l'effectif de 2000.

d. Prédiction pour 2030 :
 $u(39) = 3\,495\,100 + 39 \times r = 5\,503\,444$, soit un peu plus de 5,5 millions.

Vers le bac

p. 235

17. La croissance de population de la ville de Mumbai

1. a. Pourcentage de la population de la ville par rapport à celui de son agglomération :

$$\frac{13}{24,4} \approx 53,3\%$$

b. Population de l'Inde :

$$\frac{24,4 \times 100}{1,8} \approx 1\,355,6 \text{ millions d'habitants.}$$

Pourcentage de la ville de Mumbai :

$$\frac{13}{1\,355,6} \approx 1\% \text{ de la population indienne.}$$

2. a. La représentation de la population (doc 2) peut être ajustée par une droite. On peut envisager un modèle linéaire.

b. Équation de la droite de régression :
 $y = 0,0209x - 38,9089$.

c. Pour $x = 1\,947$, $y = 1,978$ million d'habitants en 1947.

3. a. Il y avait 3,11 millions d'habitants dans l'agglomération de Mumbai en 1950.

Le modèle exponentiel se base sur une hausse de 3,5 % par an de la population.

b. $u(n) = 3,11 \times 1,035^n$

c. $u(51) = 3,11 \times 1,035^{51} \approx 17,98$. Le résultat et la donnée pour 2001 (doc 2) sont un peu différents.

d. $u(61) = 3,11 \times 1,035^{61} \approx 25,36$. Le résultat est très différent de l'effectif de 2011.

Remarque : les prévisions pour les années 2001 et 2011 ne correspondent pas aux données réelles car le modèle ne s'applique plus, l'état indien a mis en place des mesures pour baisser le taux de natalité.

e. À l'aide de la calculatrice, on constate que $u(20) < 6,22 < u(21)$. Selon le modèle, à partir de 1971 (1 950 + 21), la population de l'agglomération de Mumbai a doublé.

CHAPITRE 13 L'intelligence artificielle

I. Introduction

Programme

L'être humain n'a cessé d'accroître son pouvoir d'action sur le monde, utilisant son intelligence pour construire des outils et des machines. Il a élaboré un mode de pensée algorithmique susceptible d'être codé dans des langages permettant de commander ces machines. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle (IA) permet l'accomplissement de tâches et la résolution de problèmes jusqu'ici réservés aux humains : reconnaître et localiser les objets dans une image, conduire une voiture, traduire un texte, dialoguer, ... Un champ de l'intelligence artificielle ayant permis des applications spectaculaires est celui de l'apprentissage machine.

Savoirs	Savoir-faire
<p>Jusqu'au début du XX^e 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, ...). Turing a été le premier à proposer le concept de machine universelle qui a été matérialisé dix ans plus tard avec les premiers ordinateurs. Ceux-ci sont constitués <i>a minima</i> d'un processeur et d'une mémoire vive.</p> <p>Un ordinateur peut manipuler des données de natures diverses une fois qu'elles ont été numérisées : textes, images, sons. Les programmes sont également des données : ils peuvent être stockés, transportés, et traités par des ordinateurs. En particulier, un programme écrit dans un langage de programmation de haut niveau (Python, Scratch...) peut être traduit en instructions spécifiques à chaque type de processeur.</p>	<p>Analyser des documents historiques relatifs au traitement de l'information et à son automatisation.</p> <p>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...).</p> <p>Savoir distinguer les fichiers exécutables des autres fichiers sous un système d'exploitation donné.</p> <p>Connaître l'ordre de grandeur de la taille d'un fichier image, son, vidéo.</p> <p>Savoir calculer la taille en octets d'une page de texte (en ASCII et non compressé).</p>
<p>Un programme peut comporter jusqu'à plusieurs centaines de millions de lignes de code, ce qui rend très probable la présence d'erreurs appelées bogues (ou <i>bugs</i>). Ces erreurs peuvent conduire un programme à avoir un comportement inattendu et entraîner des conséquences graves.</p>	<p>Étant donné un programme très simple, proposer des jeux de données d'entrée permettant d'en tester toutes les lignes.</p> <p>Corriger un algorithme ou un programme bogué simple.</p>
<p>Le terme « intelligence artificielle » (IA) recouvre un ensemble de théories et de techniques qui traite de problèmes dont la résolution fait appel à l'intelligence humaine.</p> <p>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), permet de faire des prédictions ou de prendre des décisions sur d'autres données.</p> <p>La qualité et la représentativité des données d'entraînement sont essentielles pour la qualité des résultats. Les biais dans les données peuvent se retrouver amplifiés dans les résultats.</p>	<p>Analyser des documents relatifs à une application de l'intelligence artificielle.</p> <p>Utiliser une courbe de tendance (encore appelée courbe de régression) pour estimer une valeur inconnue à partir de données d'entraînement.</p> <p>Analyser un exemple d'utilisation de l'intelligence artificielle : identifier la source des données utilisées et les corrélations exploitées.</p> <p>Sur des exemples réels, reconnaître les possibles biais dans les données, les limites de la représentativité.</p> <p>Expliquer pourquoi certains usages de l'IA peuvent poser des problèmes éthiques.</p>
<p>L'inférence bayésienne est une méthode de calcul de probabilités de causes à partir des probabilités de leurs effets. Elle est utilisée en apprentissage automatique pour modéliser des relations au sein de systèmes complexes, notamment en vue de prononcer un diagnostic (médical, industriel, détection de spam...). Cela permet de détecter une anomalie à partir d'un test imparfait.</p>	<p>À partir de données, par exemple issues d'un diagnostic médical fondé sur un test, produire un tableau de contingence afin de calculer des fréquences de faux positifs, faux négatifs, vrais positifs, vrais négatifs. En déduire le nombre de personnes malades suivant leur résultat au test.</p>

Prérequis et limites

Les probabilités étant assimilées à des fréquences, il est possible de raisonner sur des tableaux à double entrée sans faire appel explicitement à la théorie des probabilités conditionnelles ni à la formule de Bayes.

Commentaires pédagogiques

L'être humain est doté d'une intelligence qui lui permet d'appréhender le monde. Traiter l'information a été l'un de ses objectifs au travers du temps. Pour cela, il a construit des machines, et pour les commander, a créé des algorithmes codés dans des langages spécifiques.

L'intelligence artificielle (IA) permet aujourd'hui de traiter des données et de résoudre des problèmes comme le ferait un être humain. L'IA a de nombreuses applications qui peuvent inclure des biais et des limites de représentativité dans les données, poser des problèmes éthiques.

Ce chapitre développe les trois objectifs de formation de l'Enseignement scientifique. L'entraînement en IA étant axé sur les données, les trois premières activités sont consacrées à l'histoire du traitement de l'information, aux données informatiques et au débogage d'un programme informatique.

L'activité 1 montre comment les Techniques d'Information et de Communication ont évolué du boulier datant vraisemblablement de l'Antiquité jusqu'aux ordinateurs d'aujourd'hui. On reprend succinctement le fonctionnement d'un ordinateur (processeur, mémoire vive) et les ordinateurs programmables sont recensés.

L'activité 2 permet de revoir des notions vues en technologie au collège ou en SNT en seconde, concernant les fichiers, leur type (texte, image, audio, vidéo) et leur taille. Les élèves doivent distinguer les fichiers exécutables des autres fichiers et comprendre que les programmes sont également des fichiers.

Reconnaître les messages d'erreur et corriger le programme pour le déboguer constituent l'activité 3.

Avec des acquis suffisants sur les différents types de données, la conception et l'exécution d'un programme, les élèves peuvent ensuite aborder les deux activités qui suivent sur l'intelligence artificielle.

L'intelligence artificielle aidant aux décisions ou permettant des prédictions et différentes applications sont la finalité de l'activité 4. Plusieurs exemples permettent d'identifier la source des données utilisées et les corrélations exploitées. Les notions de données d'entraînement et de *big data* sont essentielles dans cette activité car elles soulignent l'importance de la qualité des données et des limites de représentativité sur la qualité des résultats. Les biais dans les données peuvent se retrouver amplifiés dans les résultats et engendrer des problèmes éthiques.

Dans l'activité 5, on étudie une application de l'inférence bayésienne dans le diagnostic médical. Un dosage sanguin peut mettre en évidence une embolie pulmonaire. Un tableau de contingence est établi à partir de données pour calculer les fréquences des faux positifs, faux négatifs, vrais positifs, vrais négatifs et en déduire le nombre de personnes malades suivant leur résultat au test. La formule de Bayes n'est pas au programme et les probabilités de l'inférence bayésienne sont assimilées à des fréquences.

Objectifs

- Connaître l'histoire du traitement de l'information.
- Savoir qu'un ordinateur manipule des données numérisées et que les programmes sont des données.
- Reconnaître les bogues (ou *bugs*) d'un programme aux conséquences parfois graves.
- Savoir ce que sont l'intelligence artificielle et l'apprentissage machine.
- Savoir que la qualité et la représentativité des données d'entraînement influencent les résultats.
- Savoir utiliser l'inférence bayésienne en vue d'un diagnostic médical.

BIBLIOGRAPHIE

► Sites Internet

- La 1^{re} carte perforée : <https://www.youtube.com/watch?v=MDQHE0W-qHs>
- Ada Lovelace et Charles Babbage : <https://www.youtube.com/watch?v=3jqgVOQfFgo>
- Alan Turing, génie au destin brisé : <https://lejournald.cnrs.fr/articles/alan-turing-genie-au-destin-brise>

II. Corrigés

Pour prendre un bon départ p. 236

1. c
2. b et c
3. a et b
4. b et c

Activités p. 238-247

Activité 1. L'histoire du traitement de l'information

• **Objectif** : Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d'élaboration

• **Commentaires sur l'activité**

Dans cette activité, les élèves vont découvrir les différentes étapes qui ont permis de vivre aujourd'hui dans un monde numérique où les ordinateurs, sous toutes leurs formes, occupent une place prépondérante. Pour cela, ils vont découvrir les hommes et les femmes qui ont porté ces avancées scientifiques. Souvent méconnus du grand public, ils avaient pourtant des dizaines d'années d'avance sur leurs contemporains sur les machines, ce qu'il était envisageable de leur demander et ce qu'elles pouvaient devenir. Pour la petite histoire, le logo Apple à la pomme croquée serait un hommage à Alan Turing, mort en croquant une pomme empoisonnée, officiellement par suicide.

• **Corrigés du guide de travail**

1. Les premières machines pouvaient réaliser des opérations mathématiques simples (addition, soustraction, multiplication, division).
2. Une carte perforée comporte 8 lignes et 80 colonnes. Sur une colonne, on a donc 8 perfo-

ration possibles. On a alors un codage binaire sur 8 bits. Une perforation vaut 1 et une absence de perforation vaut 0. On a la possibilité de coder $2^8 = 256$ caractères différents. Sur une carte, comme il y a 80 colonnes, on peut écrire 80 caractères.

3. Ada Lovelace a l'idée d'une machine qui ressemble à ce que sera un ordinateur à une époque bien avant que le téléphone et l'ampoule à incandescence ne soient inventés. L'électricité est connue seulement depuis une trentaine d'années. La machine imaginée par Ada Lovelace ne ferait qu'exécuter des instructions données par l'être humain. La machine ne crée rien, elle exécute, comme les ordinateurs aujourd'hui.

4. Alan Turing imagine la possibilité pour un ordinateur de se faire passer pour un être humain, c'est exactement ce qu'est l'intelligence artificielle aujourd'hui.

5. Les quatre types d'ordinateurs ont dû être programmés par le constructeur pour réaliser les opérations souhaitées. Le thermostat d'ambiance peut par la suite être en partie programmé par l'utilisateur. L'ordinateur de bord présente peu de possibilités de programmation par l'utilisateur, c'est uniquement de l'utilisation (GPS, radio, climatisation). Le smartphone est programmé par l'utilisateur, dans la mesure où c'est lui qui installe et configure les applications. La box internet ne peut pas non plus être programmée par l'utilisateur.

Synthèse

Au fur et à mesure que la technologie s'est développée, les Techniques d'Information et de Communication ont évolué au cours du temps : leur taille a diminué, les nombres d'opérations réalisées et le stockage ont augmenté.

Activité 2. Les données informatiques

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet aux élèves de revoir des notions vues en technologie au collège ou en SNT en seconde. Ces notions concernent les fichiers, leur type et leur taille.

L'expérience proposée dans le document 5 permet de visualiser plus concrètement le lien entre octet et caractère. S'il n'y a pas la possibilité de réaliser cette manipulation, très rapide mais qui demande un accès à un ordinateur, il est possible de projeter la vidéo d'expérience qui montre la manipulation en laissant les élèves en tirer leurs propres conclusions.

- **Expérience**

Étape 1. 1. c. Il y a 47 caractères, espaces compris. Comme chaque caractère est codé sur un octet, le fichier texte devrait avoir une taille de 47 octets.

3. Seul le bloc note possède la bonne taille. Celui du traitement de texte a une taille très différente.

Étape 2. Lors des différentes modifications, la taille du fichier du traitement de texte varie.

Étape 3. Lors des différentes modifications, la taille du fichier du bloc note ne varie pas.

- **Corrigés du guide de travail**

1. Les fichiers exécutables sont repérés par l'extension .exe. Il y a donc Google Earth et File-Zilla.

2.

Fichier	Taille	Type
①	101 Ko	Texte [Word]
②	50,6 Mo	Audio
③	878 Ko	Photo

Les fichiers textes sont les moins volumineux avec une taille inférieure ou de l'ordre de 100 Ko. Les fichiers image ont une taille supérieure et les fichiers sont plus volumineux.

Remarque : un caractère de texte est codé sur un octet. Un texte étant constitué de plusieurs milliers de caractères, sa taille est de plusieurs milliers d'octets.

Chaque pixel d'une image est codé sur 3 octets (un pour le rouge, un pour le vert, un pour le bleu). Une image étant constituée de presque 1 million de

pixels (1 280 × 720 par exemple), sa taille sera de quelques Mo.

Un fichier audio est classiquement codé sur 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage de 44 000 Hz environ soit 44 000 mesures par seconde, chacune occupant 2 octets (16 bits). Pour 3 min de musique, cela donne $2 \times 44\,000 \times 3 \times 60$ soit 15 Mo.

3. a. Le bloc note propose uniquement du texte, la mise en forme est donc minimaliste. C'est pour cela que la taille correspond à la taille des caractères. Le fichier de traitement de texte prend en charge la police, la mise en forme. Tout cela prend de la place dans la taille du fichier.

b. En changeant la police et la taille du texte, la taille du fichier augmente. Chaque modification est enregistrée, l'information est stockée, ce qui nécessite de la place sur le disque lors de l'enregistrement.

c. Si on effectue les mêmes opérations sur le bloc note, la taille du fichier n'est pas modifiée, elle reste à 47 octets.

Synthèse

Une donnée est la représentation codée d'une information qui peut être traitée par un ordinateur. Un programme, un texte ou une image contiennent des informations, sous forme de texte ou autre. Cette information est codée pour qu'elle puisse être stockée, lue ou utilisée par l'ordinateur. Cela montre donc qu'un programme, un texte ou une image sont des données informatiques.

Activité 3. Débuguer un programme informatique

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques

- **Commentaires sur l'activité**

L'activité a pour objectif de familiariser les élèves au langage de programmation Python. Comme en seconde et en première, il n'est pas attendu de leur part qu'ils soient en mesure d'élaborer un programme en Python. Ils doivent être capables de comprendre et de reconnaître les bogues en analysant les messages d'erreur et de modifier un programme. Cette activité n'est bien évidemment pas exhaustive mais regroupe les erreurs de programmation classiques que rencontrent les débutants en programmation. Une partie TP est proposée en langage Python, celui-ci étant utilisé dans différentes matières (mathématiques, physique

chimie, SVT, SI, SNT...). Les programmes Python peuvent être exécutés ou modifiés depuis l'espace Python dédié. Comme pour l'activité 2, si les conditions ne sont pas réunies pour laisser les élèves expérimenter, une vidéo peut être projetée, où les programmes sont exécutés pour voir les messages d'erreur, puis corrigés.

Erratum : pour le deuxième programme du doc 2, l'erreur prévue (erreur d'indentation des lignes 5, 6 et 7) n'est pas présente dans la première impression du manuel. Ceci a été corrigé dans les réimpressions.

• Expériences

► Doc 2, programme 1 :

```
while nombre_mois<=400
    ^
```

SyntaxError: invalid syntax

Il manque « : » après 400 pour que la fonction « while » soit correctement écrite.

Une fois les « : » ajoutés, le programme s'exécute correctement.

► Doc 2, programme 2 :

```
nombre_mois=annee*12
    ^
```

IndentationError: expected an indented bloc

Les trois dernières lignes doivent être indentées. Une fois l'indentation rajoutée, le programme s'exécute normalement.

► Doc 2, programme 3 :

```
while nombre_mois<=400:
```

NameError: name 'nombre_mois' is not defined

La fonction « while » impose une condition sur la valeur de « nombre_mois », il faut que cette valeur soit inférieure ou égale à 400. Comme on n'a pas donné la valeur initiale de « nombre_mois », le programme est incapable de comparer quoi que ce soit. Il ne peut donc exécuter aucune action. Il faut ajouter en début de programme « nombre_mois=0 » pour indiquer qu'au départ le nombre de mois écoulés est égal à 0.

► Doc 4, programme 1 :

TypeError: '<' not supported between instances of 'str' and 'int'

La fonction « input » renvoie à une chaîne de caractères, du texte. Comme on demande de

comparer la valeur de l'âge avec la valeur 18, il y a une erreur, on ne peut pas comparer la valeur d'un texte. Il faut donc préciser que le texte entré est une valeur. Il faut pour cela utiliser par exemple la fonction `int(input())`. Le texte entré (15 par exemple), sera alors compris comme un entier.

► Doc 4, programme 2 :

NameError: name 'valeur_I' is not defined

Les listes définies s'appellent `intensite` et `tension`. C'est ainsi qu'il faut les nommer pour pouvoir aller chercher les valeurs qu'elles renferment.

Dans la fonction « plot », on appelle les valeurs de deux listes `valeur_I` et `valeur_U`. Ces listes ne sont pas connues par le programme, il faut mettre en cohérence les noms de listes (soit `intensite` soit `valeur_I` pour l'une, soit `tension` soit `valeur_U` pour l'autre).

• Corrigés du guide de travail

1. C'est la fonction `while` (tant que) qui est utilisée dans les programmes du doc 2 pour créer une boucle. Le programme s'exécute tant que la condition est vérifiée.

2. « `while nombre_mois<=400` » indique que le programme va s'arrêter quand la variable « `nombre_mois` » arrivera à 400. La valeur 401 ne sera pas traitée.

3. Deux variables sont utilisées, « `annee` » et « `nombre_mois` ». Ce sont des nombres, le programme ne précise pas si ce sont des décimaux ou des entiers. Comme ce sont des nombres, des comparaisons de valeurs sont possibles (`>`, `<...`).

4. L'âge de l'utilisateur est stocké dans la variable « `age` ».

Synthèse

Dans un message d'erreur, on doit regarder d'abord la dernière ligne qui indique le problème que rencontre le programme, comme par exemple :

- « '<' not supported between instances of 'str' and 'int' ». Le programme ne peut pas dire si une chaîne de caractères est plus grande ou plus petite qu'une autre, il lui faut des nombres pour faire cette comparaison ;

- « name 'valeur_I' is not defined ». On utilise une variable appelée `valeur_I` qui n'est pas connue, une erreur dans l'écriture ou dans la définition de cette variable ayant été faite.

Le corps du message est à regarder ensuite afin de savoir à quel endroit du code, indiqué par une flèche, le problème est rencontré.

Activité 4. L'intelligence artificielle

- **Objectif** : Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques, Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement

- **Commentaires sur l'activité**

Cette activité permet de faire comprendre aux élèves avec de nombreux exemples ce qu'est l'intelligence artificielle, les clés qui font sa réussite et les précautions à prendre avec l'introduction de biais dans les données sources. Nous avons centré cette activité sur la notion d'apprentissage machine avec une partie TP sur les courbes de tendance conduisant à une extrapolation des données existantes.

- **Expérience**

3. Équation de la droite : $y = 2,988x - 16,034$.

Équation de la parabole :

$$y = 0,0882x^2 - 0,5833x + 19,49.$$

Hauteur d'eucalyptus	Circonférence prévisionnelle avec le modèle linéaire	Circonférence prévisionnelle avec le modèle parabolique
13 m	22,8 cm	26,8 cm
27 m	64,6 cm	68,0 cm

- **Corrigés du guide de travail**

1. Un algorithme d'intelligence artificielle apprend des données qu'il reçoit, c'est-à-dire des données passées. Plus la quantité de données est importante, plus il aura de matière pour apprendre et mieux la tâche qu'il réalisera sera de qualité et correspondra à ce que les êtres humains ont réalisé dans le passé et donc à ce qu'un être humain ferait.

2. L'intelligence artificielle a pour but d'aider l'être humain dans des tâches qui pourraient être longues, fastidieuses et répétitives. L'intelligence artificielle reproduit ce qui a déjà été fait, à une plus grande échelle et plus rapidement. L'être humain peut ainsi créer et innover, ce qu'une machine est incapable de réaliser.

3.

Domaine d'application	Données sources	Contenus proposés
Agriculture	Relevés de mesures sur des populations d'arbres existants.	Prédictions sur la circonférence d'arbres qui permettent de faire des projections économiques
Commerce de maquillage	Données corrélant traits et teint du visage.	Le <i>chatbot</i> propose au client la couleur de maquillage qui correspond le mieux aux traits et au teint de son visage.
Service de vidéo à la demande	Habitudes personnelles des utilisateurs en termes de programmes regardés et des heures associées.	Le service propose les vidéos et les films dont les contenus et les thèmes correspondent aux habitudes du client et à l'heure à laquelle il regarde.

4. a. Pour des hauteurs d'eucalyptus compris entre 15 m et 25 m, le modèle linéaire suit le nuage de points.

En revanche, le modèle parabolique suit le nuage de points sur un domaine plus vaste, c'est-à-dire sur la quasi-totalité de ceux-ci. C'est pour cette raison que le modèle parabolique paraît le plus adapté, du moins avec les données sources que nous avons.

b. Les hauteurs de 13 m et 27 m font partie des valeurs extrêmes des données sources proposées. Il vaut mieux utiliser le modèle parabolique. Les valeurs trouvées avec le modèle parabolique sont bien en accord avec les données sources car la courbe passe, pour ces valeurs, au milieu du nuage de points.

Pour avoir la confirmation de la validité du modèle choisi, ou l'améliorer si besoin, il faudrait augmenter la quantité des données, surtout sur les petites hauteurs et les grandes hauteurs pour voir si la tendance sur les valeurs extrêmes se confirme.

5. Un biais dans les données est présent lorsque celles-ci sont orientées d'une façon ou d'une autre. L'orientation sera reproduite par la machine car l'intelligence artificielle ne peut ni réfléchir, ni prendre des décisions éthiques, elle ne fait que reproduire ce qu'elle a appris. Par exemple, pendant de nombreuses années, certains métiers n'étaient faits que par des hommes, sans raison objectivement valable. Désormais, il n'est plus éthiquement possible de préférer un homme plu-

tôt qu'une femme à un poste, avec la seule raison que c'est un homme. Ceci étant, l'intelligence artificielle ne prend pas en compte cet aspect éthique, elle reproduit ce qu'elle connaît, et donc les éventuelles inégalités passées.

Lutter contre ces biais n'est pas simple car cela veut dire qu'il faudrait manipuler les données sources, ce qui n'est pas acceptable, ou alors modifier l'algorithme pour qu'il compense ces biais. Sans analyser précisément les biais des données sources, cela peut créer d'autres inégalités.

Synthèse

L'intelligence artificielle peut être utilisée dans tous les domaines pour lesquels les êtres humains ont des années d'expérience afin que l'algorithme puisse apprendre de cette expérience. Dans le domaine de la beauté, on sait quelle couleur de cheveux ou de fond de teint est adaptée à telle ou telle forme de visage. Dans tous les domaines où il y a des analyses de données à effectuer, l'intelligence artificielle trouve sa place car elle peut réaliser la compilation de ces données, afin de connaître l'opération à réaliser de manière plus rapide que ne le ferait un être humain. Son utilisation s'arrête là où il est nécessaire d'innover.

Son utilisation est limitée si la quantité et la représentativité des données sources ne sont pas satisfaisantes. Si elles comportent des biais, qu'elles véhiculent des inégalités passées, l'intelligence artificielle reproduira ces inégalités car elle n'a pas la possibilité d'avoir un regard éthique sur les opérations réalisées.

Activité 5. L'inférence bayésienne au service du diagnostic médical

- **Objectif** : Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et l'environnement
- **Commentaires sur l'activité**

L'activité permet de montrer aux élèves l'application que peut avoir l'IA dans le diagnostic d'une embolie pulmonaire à partir d'un test sanguin.

Sont abordées les notions de vrais et faux positifs, vrais et faux négatifs, ainsi que la valeur seuil qu'il est nécessaire de déterminer au préalable pour que le test soit performant. Les élèves peuvent comprendre à partir de cet exemple qu'un test n'est jamais parfait et les limites de l'IA dans le diagnostic médical.

Cette activité peut être donnée par équipes où chaque élève ou binôme travaille sur une valeur seuil puis les résultats sont mis en commun pour que tous puissent tracer la courbe ROC (voir par-cours 2).

• Corrigés du guide de travail

1. Les D-dimères sont produites lors de la destruction d'un caillot sanguin par l'organisme. Or un caillot de sang qui migre vers une artère pulmonaire peut causer une embolie pulmonaire. En dosant les D-dimères dans le sang, on peut établir la probabilité que le patient a de faire une embolie pulmonaire. Le test sanguin est rapide, non dangereux pour le patient et peu coûteux par rapport à d'autres examens.

2. Les vrais positifs (VP) sont tous les patients avec embolie pulmonaire ayant une concentration supérieure à $500 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ soit $VP = 36 + 39 + 81 + 139 = 295$.

Les faux négatifs (FN) sont tous les patients avec embolie pulmonaire ayant une concentration inférieure à $500 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ soit $FN = 0 + 1 = 1$.

Les faux positifs (FP) sont tous les patients sans embolie pulmonaire ayant une concentration supérieure à $500 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ soit $FP = 227 + 109 + 71 + 46 = 453$.

Les vrais négatifs (VN) sont tous les patients sans embolie pulmonaire ayant une concentration inférieure à $500 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ soit $VN = 158 + 183 = 341$.

On peut alors réaliser le tableau suivant.

		Diagnostic	
		Malade (296)	Non malade (794)
Résultats au test	Positif	Vrais positifs (VP) 295	Faux positifs (FP) 453
	Négatif	Faux négatifs (FN) 1	Vrais négatifs (VN) 341

3. La proportion de vrais positifs parmi les personnes malades est donnée par :

$$\frac{VP}{VP + FN} = \frac{295}{296} = 0,997 \text{ ou } 99,7 \%$$

La proportion de vrais négatifs parmi les personnes non malades est donnée par :

$$\frac{VN}{FP + VN} = \frac{341}{794} = 0,429 \text{ ou } 42,9 \%$$

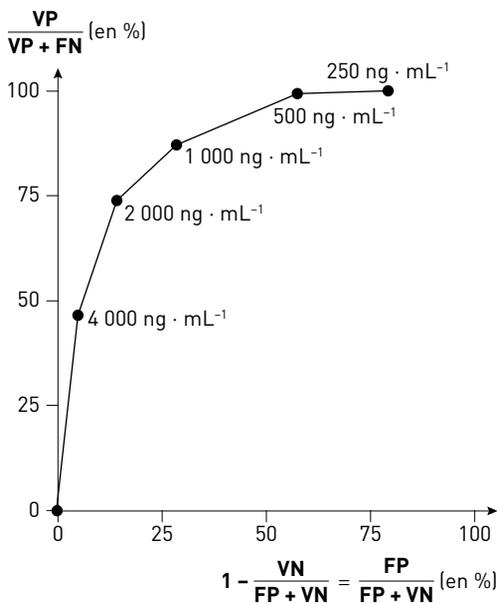
Il y a très peu de faux négatifs parmi les personnes malades (moins de 1 %) mais il y a un certain nombre de faux positifs parmi les personnes non malades (environ 57 %). Le test n'est donc pas parfait. Il ne donne qu'une probabilité que la per-

sonne soit malade si le test est positif mais il ne permet pas de donner un diagnostic définitif.

4. a. et b.

	Seuil en $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$				
	250	500	1 000	2 000	4 000
VP	296	295	259	220	139
FN	0	1	37	76	157
FP	636	453	226	117	46
VN	158	341	568	677	748
$\frac{VP}{VP + FN}$	100 %	99,7 %	87,5 %	74,3 %	47,0 %
$\frac{VN}{FP + VN}$	20,0 %	42,9 %	71,5 %	85,2 %	94,2 %
$1 - \frac{VN}{FP + VN}$	80,0 %	57,1 %	28,5 %	14,8 %	5,8 %

c.



d. En ordonnées, plus la valeur est proche de 100 %, moins il y a de faux négatifs, donc plus le test est fiable : un test au résultat positif confirme le diagnostic.

Les deux seuils de valeur 250 et 500 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ sont les plus satisfaisants.

En abscisses, plus la valeur est faible, moins il y a de faux positifs. À 500 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$, il y a un certain nombre de faux positifs. Mais comme le taux de faux négatifs est inférieur à 1 %, le choix de ce seuil semble être bon, surtout par rapport à la valeur seuil de 250 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ où le pourcentage de faux positifs est très élevé (80 %).

• **Synthèse**

Le test est donc une aide au diagnostic car si le test est positif alors il y a de fortes probabilités que le patient soit atteint d'embolie pulmonaire. Le test est plus rapide que les autres examens proposés.

Le test n'est pas parfait : il y a des faux négatifs (des patients malades non détectés, ce qui peut retarder leur prise en charge) et des faux positifs (des patients supposés malades alors qu'ils ne le sont pas, ce qui est une source de stress).

Comme il y a beaucoup de faux positifs, cela oblige à pratiquer d'autres examens pour confirmer le diagnostic. Cependant, cela évite de faire des examens comme des radiographies à tous les patients : seuls les malades et les faux positifs auront cet examen.

Se tester

p. 250

1. a, b et d
2. a. Fichier texte : 35 Ko
b. Fichier audio : 9 Mo
c. Fichier image : 3 Mo
d. Fichier vidéo : 55 Mo
3. Le programme 1 ne présente pas de bogue. Le programme 2 présente un bogue (fonction input qui renvoie une chaîne de caractères). Le programme 3 présente un bogue. Dans la fonction « print », le prix à payer n'est pas entre guillemets ; or il devrait l'être car c'est du texte.
4. a. Vrai b. Faux c. Vrai d. Faux
5. a. 1 (Vrais positifs)
b. 4 (Faux positifs)
c. 3 (Faux négatifs)
d. 2 (Vrais négatifs)

Travailler des compétences scientifiques

p. 251

7. Programmer en langage Python pour exploiter des données

```
##Définition des variables
VP=75
FP=30
FN=40
VN=210
```

```
##Application des formules
Tvp=VP/(VP+FN)
Tvn=VN/(FP+VN)
##Affichage des résultats
print("Pour ce test, la proportion de vrais positifs parmi les personnes malades est de", round(Tvp,3), "et la proportion de vrais négatifs parmi les personnes non malades est de", round(Tvn,3), ".")
```

Remarque : on choisit ici de n'afficher que trois chiffres significatifs, cependant on peut visualiser le résultat avec la précision de Python (23 bits ici) en tapant le nom de la variable.

Appliquer

p. 252

8. L'ordinateur

1. Le processeur organise les échanges entre les différents périphériques, exécute les programmes et effectue les calculs.

La mémoire vive sert à stocker des informations de manière temporaire.

Les périphériques permettent les interactions entre l'utilisateur et l'ordinateur.

2. Sur le schéma, il y a comme périphériques l'écran, le clavier, le disque dur et la souris.

9. Des tailles de fichiers

1. Les fichiers GeoGebra-Windows-Installer et GoogleEarthProWin sont des fichiers exécutables.

2. Geogebra-Windows-Installer a une taille de 66,4 Mo, GoogleEarthProWin a une taille de 56,2 Mo.

3. Non, il n'y a pas de fichier video dans ce dossier, on le voit dans la colonne « type ».

10. Des messages d'erreur

1. Le module « matplotlib.pyplot » n'est pas reconnu par Python car il y a une faute d'orthographe, il s'agit de « pyplot ».

2. Lorsque qu'on code une boucle avec une fonction de type « if », « while », etc., il faut que les lignes suivantes du programme, correspondant aux actions à réaliser, soient indentées c'est-à-dire décalées d'une tabulation. Cette tabulation n'a pas été faite dans le programme exécuté.

3. Dans une fonction du programme, on utilise la lettre U qui peut être une variable ou une liste. Le message d'erreur indique que U n'a pas été définie donc le programme ne peut pas l'utiliser dans une fonction.

11. L'analyse d'un test

1. Si la sensibilité est élevée, étant donné la relation donnée, il y a très peu de faux négatifs. Cela implique qu'un résultat négatif élimine le diagnostic. La formule de sensibilité ne donne accès à aucune information sur le nombre de faux positifs. Il n'est donc pas possible de valider ou d'invalider l'affirmation 1.

Donc, pour les tests à sensibilité élevée, pour l'affirmation 1, il faut raisonner plutôt sur le résultat négatif. Ce sont des tests utilisés plutôt pour le dépistage.

2. Si la spécificité est élevée, étant donné la relation, il y a très peu de faux positifs. Cela implique qu'un résultat positif confirme le diagnostic.

L'affirmation 2 est donc incorrecte.

S'entraîner

p. 253-254

12. La taille d'un fichier image

1. La résolution 1 280 × 720 permet de calculer le nombre de pixels. $N = 1\,280 \times 720$ soit 921 600 pixels.

2. Comme il y a trois rectangles colorés (lumino-phores) par pixels, cela donne $N' = 3 \times 921\,600$ soit 2 764 800 luminophores ou $2,76 \times 10^6$ luminophores.

3. Chaque intensité lumineuse d'un luminophore est codé sur un octet. La taille de cette image est donc de 2 764 Ko ou 2,76 Mo.

13. La taille d'un fichier audio

1. Pour une valeur, on utilise 16 bits. Pour une seconde, on a 44 000 valeurs donc $16 \times 44\,000$ soit 704 000 bits.

2. En octet, cela donne $\frac{704\,000}{8}$ soit 88 000 octets ou 88 Ko.

3. Si le morceau dure 3 min et 30 s, la taille du fichier audio est $(3 \times 60 + 30) \times 88$ soit 18 480 Ko ou 18,48 Mo.

14. Le débogage

1. Il manque « : » après la fonction « if ».

La ligne suivante doit être indentée.

Dans la fonction « print », « Le prix à payer est » doit être entre guillemets car c'est du texte et ce n'est pas une variable.

2. Pour 50 km, il faudra payer $45 + (50 \times 0,20)$ soit 55 €.

3. Pour 150 km, il faudra payer $45 + (150 \times 0,30)$ soit 90 €.

15. Des applications de l'intelligence artificielle

Application	Données sources	Pourquoi parler de machine learning ?
Chatbot	Les questions les plus couramment posées.	Le <i>chatbot</i> apprend les réponses aux questions précédemment posées pour pouvoir répondre ensuite.
Site itinéraire routier	Les données (vitesses, positions) des autres utilisateurs de l'application.	Les données collectées sont prises en compte dans les différents calculs d'itinéraires possibles. L'application semble être capable de s'adapter en temps réel, comme une personne qui apprendrait les données qu'il possède.
Jeux FPS	Les parties précédemment jouées par l'utilisateur.	Le jeu apprend de ses erreurs passées sur certaines phases de jeu afin d'essayer d'autres stratégies et ainsi compliquer la partie pour le joueur.

16. L'estimation des prix d'appartements sur un site internet

1. Le prix est en k€ c'est-à-dire en milliers d'euros.

2. La courbe de tendance est de type linéaire car c'est une droite qui semble passer par l'origine.

3. En déterminant l'équation de la droite de régression, on peut connaître le prix d'un appartement de 150 m² en considérant qu'en dehors des données la courbe de tendance est toujours valable.

4. a. Pour un appartement de 55 m², le prix est :

$8\,376 + 3\,047 \times 55$ soit 176 k€.

b. Pour un appartement de 150 m² le prix est : $8\,376 + 3\,047 \times 150 = 465$ k€.

17. La mammographie, test diagnostic du cancer du sein

1. Dans les deux cas, la population contient 1 000 patientes.

- La fréquence de la maladie dans la population est donnée par le quotient du nombre de VP additionné du nombre de FN et du nombre total de patientes.

Pour la population 1, on a : $\frac{85 + 15}{1\,000}$ soit 10 %.

Pour la population 2, on a : $\frac{127 + 23}{1\,000}$ soit 15 %.

- La fréquence de la maladie chez les personnes dont le test est positif est donnée par le quotient du nombre de VP et du nombre de VP additionné du nombre de FP.

Pour la population 1, on a : $\frac{85}{85 + 270}$ soit 24 %.

Pour la population 2, on a : $\frac{127}{127 + 255}$ soit 33 %.

- La fréquence des faux positifs parmi les personnes non malades est donnée par le quotient du nombre de FP et du nombre de VN additionné du nombre de FP.

Pour la population 1, on a : $\frac{270}{270 + 630}$ soit 30 %.

Pour la population 2, on a : $\frac{255}{255 + 595}$ soit 30 %.

- La fréquence des faux négatifs parmi les personnes malades est donnée par le quotient du nombre de FN et du nombre de VP additionné du nombre de FN.

Pour la population 1, on a : $\frac{15}{15 + 85}$ soit 15 %.

Pour la population 2, on a : $\frac{23}{23 + 127}$ soit 15,3 %.

2. La fréquence de la maladie chez les personnes dont le test est positif est plus forte que la fréquence dans la population : c'est le principe de l'inférence bayésienne.

La fréquence de la maladie dans la population a une influence sur la fréquence de la maladie chez les personnes dont le test est positif mais n'a aucune influence sur le caractère imparfait du test (pourcentage de faux positifs et de faux négatifs), donc sur sa valeur diagnostique.

18. Une comparaison des performances

Test	VP	FP	FN	VN
Nombre	525	1	21	536
Nombre total = 525 + 1 + 21 + 536 = 1 083				
Pourcentage = Nombre 1 083 × 100	48,5 %	0,09 %	1,9 %	49,5 %

2. On effectue les mêmes calculs pour les deux autres tests : le nombre total de personnes testées est également de 1 083 pour les deux autres tests.

Test	VP	FP	FN	VN
Chembio	48,5 %	0,09 %	1,9 %	49,5 %
MedMira	43,8 %	0,09 %	6,6 %	49,5 %
OraSure	49,3 %	0,18 %	1,1 %	49,4 %

On sait qu'aucun test n'est parfait, il y a toujours des faux positifs et des faux négatifs. Le raisonnement pour discuter la performance des tests doit donc se faire sur les pourcentages de faux positifs et de faux négatifs.

Dans tous les cas, le pourcentage de faux positifs est très faible, donc un résultat positif confirme très bien le diagnostic.

Mais le test OraSure a très peu de faux négatifs, notamment par rapport au test MedMira et un peu plus de VP par rapport au test Chembio.

Donc le test OraSure semble être le test le plus performant.

Vers le bac p. 255

19. Le dépistage de la trisomie 21

1. Les pertes fœtales sont données par le quotient du nombre de pertes fœtales et du nombre de caryotypes fœtaux effectués.

$$S1 : \frac{19}{14\,146} \text{ soit } 0,13 \%$$

$$S2 : \frac{1}{816} \text{ soit } 0,12 \%$$

$$S3 : \frac{4}{3\,014} \text{ soit } 0,13 \%$$

Le pourcentage de faux positifs est donné par le quotient du nombre de faux positifs et du nombre total de tests effectués, fois 100.

$$S1 : \frac{13\,404}{742 + 13\,404 + 505\,097 + 179} \times 100 \text{ soit } 2,6 \%$$

$$S2 : \frac{29}{788 + 29 + 520\,378 + 193} \times 100 \text{ soit } 0,006 \%$$

$$S3 : \frac{2\,015}{909 + 2\,105 + 518\,247 + 99} \times 100 \text{ soit } 0,4 \%$$

2. On peut aussi calculer le pourcentage de faux négatifs :

$$S1 : \frac{179}{519\,422} \times 100 \text{ soit } 0,03 \%$$

$$S2 : \frac{193}{521\,388} \times 100 \text{ soit } 0,04 \%$$

$$S3 : \frac{99}{521\,360} \times 100 \text{ soit } 0,02 \%$$

Ainsi que le pourcentage de vrais positifs :

$$S1 : \frac{742}{519\,422} \times 100 \text{ soit } 0,14 \%$$

$$S2 : \frac{788}{521\,388} \times 100 \text{ soit } 0,15 \%$$

$$S3 : \frac{909}{521\,360} \times 100 \text{ soit } 0,17 \%$$

Le pourcentage de pertes fœtales est quasiment le même, quelle que soit la stratégie de dépistage, ce qui est cohérent puisque ce pourcentage dépend de la technique d'amniocentèse elle-même.

Donc limiter le nombre de caryotypes fœtaux (et donc d'amniocentèse) à effectuer permet de diminuer le nombre de pertes fœtales. C'est pourquoi la stratégie 1 n'est pas la plus favorable.

Le pourcentage de faux positifs est très faible pour la stratégie 2, ce qui est intéressant car cela limite les cas de stress lié à la perspective d'avoir un enfant atteint de trisomie 21. De plus, cette stratégie permet de détecter plus de cas de trisomie 21. Elle permet de limiter le nombre d'amniocentèses à effectuer donc le nombre de pertes fœtales.

Le pourcentage de faux positifs est un peu plus élevé pour la stratégie 3 mais reste beaucoup plus faible que celui de la stratégie 1.

Les pourcentages de faux négatifs et de vrais positifs montrent que plus de trisomies sont détectées pour la stratégie 3, ce qui fait que cette stratégie est la plus efficace en termes de dépistage. Mais le nombre de pertes fœtales est un peu plus élevé que pour la stratégie 2.

Donc un vrai débat doit se poser pour le choix à effectuer en santé publique entre les stratégies 2 et 3.

Sujet 1

p. 260-261

1. La centrale thermique de cogénération à biomasse

1. Les puissances P_1 , P_2 , P_3 et P_4 ont pour valeurs respectives :

a. $P_1 = 4,6$ MW

b. $P_2 = 4,3$ MW

c. $P_3 = 7,4$ MW

d. $P_4 = 6,5$ MW

2. a. On a les relations : $\eta_1 = \frac{P_2}{P_1}$, $\eta_2 = \frac{P_4}{P_3}$ et $\eta = \eta_1 \times \eta_2$.

b. $\eta_1 = \frac{4,3}{4,6} = 0,93$.

$\eta_2 = \frac{6,5}{7,4} = 0,88$.

$\eta = \eta_1 \times \eta_2$ soit $\eta = 0,93 \times 0,88 = 0,82$.

3. La puissance P fournie par la biomasse est la somme des puissances fournies au turbo-alternateur et à l'échangeur thermique d'où $P = P_1 + P_3$ donc $P = 4,6 + 7,4$ soit $P = 12,0$ MW.

4. a. Dans une centrale thermique, il n'y a pas d'échangeur thermique. Donc la puissance fournie par la biomasse n'est fournie qu'au turbo-alternateur. La puissance fournie par la biomasse est seulement convertie en puissance électrique.

Donc on a bien la relation : $\eta' = \frac{P_2}{P}$.

b. $\eta' = \frac{4,3}{12,0} = 0,36$. Ce résultat est très inférieur à celui trouvé pour η car la puissance fournie à l'échangeur thermique de la centrale de cogénération est de la puissance perdue dans la centrale classique, étant donné qu'il s'agit de puissance thermique.

5. L'impact sur le réchauffement climatique d'une centrale de cogénération est moins important que pour une centrale classique. En effet, la puissance thermique dans une centrale classique constitue les pertes alors que dans la centrale de cogénération, la puissance thermique est fournie à l'échangeur thermique.

6. a. Si on considère que l'énergie est obtenue sur une année complète, on a la relation :

$$E = P \times \Delta t \text{ d'où } E = 12,0 \times 24 \times 365 \text{ soit}$$

$$E = 1,05 \times 10^5 \text{ MWh.}$$

b. La masse de biomasse utilisée m en une année

est donnée par la relation : $m = \frac{E}{E_1}$ d'où

$$m = \frac{1,05 \times 10^{11}}{4 \times 10^3} \text{ soit } m = 2,6 \times 10^7 \text{ kg.}$$

c. La quantité de biomasse à utiliser en une année est considérable. La biomasse contient du carbone, donc sa combustion produit du CO_2 . Par contre, lors de la croissance des arbres, de la canne à sucre, etc., la biomasse capte du CO_2 pour réaliser la photosynthèse. On peut donc considérer que le bilan carbone est nul.

2. La surveillance des cancers de la prostate

1.

		Diagnostic des patients	
		Cancer	Pas de cancer
Dosage des phosphatases acides	Test positif	Vrais positifs (VP) : 112	Faux positifs (FP) : 45
	Test négatif	Faux négatifs (FN) : 60	Vrais négatifs (VN) : 315

2. Fréquence de la maladie = $\frac{\text{nombre de personnes atteintes d'un cancer}}{\text{nombre total de patients}}$

$$\text{Fréquence de la maladie} = \frac{112 + 60}{532} = 32,3 \%$$

3. Fréquence = $\frac{112}{112 + 45} = 71,3 \%$

4. La fréquence de la maladie chez les personnes dont le test s'est révélé positif est plus élevée que la fréquence de la maladie dans la population.

Elle est plus élevée car on calcule la fréquence en sachant que le test est positif : c'est le principe de l'inférence bayésienne.

5. a. Ces deux valeurs permettent de déterminer la fiabilité du test (elles correspondent à ce que l'on appelle la sensibilité (Tvp) et la spécificité (Tvn) du test).

En effet, plus Tvp est élevé moins il y a de faux négatifs.

Et, plus Tvn est élevé moins il y a de faux positifs.

b. $Tvp = \frac{112}{112 + 60} = 65 \%$

$$Tvn = \frac{315}{315 + 45} = 87,5 \%$$

T_{vp} est relativement faible, il y a beaucoup de faux négatifs. Le test ne permet pas d'être fiable pour diagnostiquer un cancer.

Mais T_{vn} est plutôt élevé, il y a peu de faux positifs. Le test permet donc de surveiller les cancers de la prostate.

c. C'est une erreur d'écriture de fonction. Il faut écrire « $\text{round}(T_{vp},3)$ » au lieu de « $\text{rond}(T_{vp},3)$ » dans la fonction « print ».

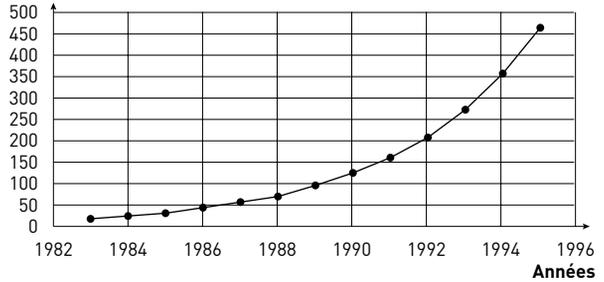
6. On observe que la sensibilité n'est correcte que pour les patients atteints du stade D (79,7 %). Pour les autres, elle est beaucoup trop faible (moins de 50 %) c'est-à-dire qu'il y a trop de faux négatifs.

Donc, la sensibilité n'est pas assez bonne pour utiliser ce dosage pour déterminer le stade du cancer dont les patients sont atteints.

Erratum : une partie de la question n'apparaît pas lors de la première impression. Ceci a été corrigé lors des réimpressions. Voici la question dans son intégralité : « Une étude du dosage des phosphatases a été menée sur des patients atteints de cancer à des stades différents. Discuter de la possibilité d'utiliser le dosage des phosphatases pour déterminer le stade du cancer de la prostate. »

2.

Nombre de bouquetins



Évolution de la population des bouquetins entre 1983 et 1995.

3. La courbe obtenue est dite en J, elle semble donc représentative d'une croissance exponentielle (ou géométrique).

4. Population des bouquetins en 1983 = $V_1 = 20$ bouquetins

Population des bouquetins en 1984 = $V_2 = 26$ bouquetins

$$V_2 - V_1 = 6$$

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = 0,3$$

On réalise le même calcul pour les années suivantes.

Sujet 2 p. 262-263

1. La population de bouquetins des Alpes du Massif de Belledonne

1. Le taux de variation entre deux valeurs V_1 et V_2 est égal au rapport $\frac{V_2 - V_1}{V_1}$.

Population des bouquetins en 1983 = $V_1 = 20$ bouquetins

Population des bouquetins en 1995 = $V_2 = 466$ bouquetins

$$V_2 - V_1 = 446$$

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = 22,3$$

Le taux de variation de la population de bouquetins entre 1983 et 1995 est 22,3.

Année	Nombre de bouquetins	Taux de variation annuel
1983	20	-
1984	26	0,30
1985	34	0,31
1986	44	0,29
1987	57	0,30
1988	74	0,30
1989	97	0,31
1990	125	0,29
1991	163	0,30
1992	212	0,30
1993	276	0,30
1994	358	0,30
1995	466	0,30
Moyenne des taux de variation		0,30

La moyenne des taux de variation de 1983 à 1995 est 0,30.

5. Soit P_n la population initiale à l'année n . Le taux de variation annuel étant de 0,3, à l'année $n + 1$, la population a crû de $0,3 \times P_n$. Donc :

$$P_{n+1} = P_n + 0,3P_n = 1,3P_n$$

Le taux de multiplication annuel est donc bien de 1,3, comme annoncé par l'ONCFS.

6. Par définition, une suite géométrique s'écrit $u(n) = u(0) \times q^n$.

$u(0)$ est la valeur initiale de l'effectif de la population au début de l'étude, ici 20 bouquetins.

q est la raison de la suite et correspond au coefficient multiplicateur associé au taux de variation de la population supposé constant, ici 1,3.

On a donc : $u(n) = 20 \times 1,3^n$, n représente le nombre d'années écoulées depuis 1983.

7. Nombre d'années entre 1983 et 2006 : 23 ans

$$P_{2006} = 20 \times 1,3^{23} = 8\,351 \text{ bouquetins}$$

Nombre d'années entre 1983 et 2007 : 24 ans

$$P_{2007} = 20 \times 1,3^{24} = 10\,856 \text{ bouquetins}$$

8. Les populations attendues en 2006 et 2007 sont respectivement de 8 351 et 10 856 bouquetins. Or les populations dénombrées ne sont que de 1 030 et 1 070 individus.

D'après le texte proposé, on sait que le bouquetin des Alpes est herbivore, il se nourrit d'une quantité considérable de végétaux. Il vit en moyenne et haute montagne (jusqu'à 2 700 à 3 300 mètres d'altitude). Il est de plus très exigeant sur la forme du sol. Ainsi, il recherche des murailles abruptes, des falaises à pics ou des parois escarpées.

On peut donc supposer que la quantité disponible de végétaux en montagne est limitée, ainsi que l'espace pour accueillir une population trop importante de bouquetins.

L'accroissement virtuel de la population trouve donc une limite liée à l'abondance des ressources alimentaires et de l'espace disponible et la population tend, par conséquent, de plus en plus à devenir stationnaire. C'est d'ailleurs ce qu'a prévu le mathématicien Verhulst.

2. La dédieselisation

1. Les bonnes réponses sont celles données en b et en d.

2. a. ρ est la masse volumique du corps en $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$, m est sa masse en kg et V est son volume en L.

b. À partir de la relation qui donne la masse volumique d'un corps, on en déduit la masse m du corps soit $m = \rho \times V$. Donc $m = 850 \times 45$ soit $m = 3,83 \times 10^4 \text{ g}$.

La quantité de matière de gazole est le nombre de moles n contenues dans la masse m ; on l'obtient

en divisant la masse m par la masse d'une mole, ce qui donne : $n = \frac{38\,300}{167}$ soit 229 mol.

3. a. D'après l'équation de réaction écrite dans le doc 1, on remarque que 4 moles de gazole produisent 48 moles de CO_2 , ou plus simplement qu'une mole de gazole produit 12 moles de CO_2 . On peut donc écrire : $n_{\text{CO}_2} = 12 n$.

b. $n_{\text{CO}_2} = 12 \times 229$ soit $n_{\text{CO}_2} = 2,75 \times 10^3$ mol et $m = 2,75 \times 10^3 \times 44$ soit $m = 1,21 \times 10^5 \text{ g}$ ou 121 kg.

c. En considérant qu'en une année une voiture diesel parcourt 25 000 km, elle doit consommer $\frac{4,5 \times 25\,000}{100}$ L de gazole, c'est-à-dire que son utilisateur doit faire $\frac{4,5 \times 25\,000}{100 \times 45}$ soit 25 pleins.

La masse de CO_2 produit en année par une voiture diesel est donc : $m_{\text{an}} = 121 \times 25$ soit

$$m_{\text{an}} = 3,03 \times 10^3 \text{ kg} = 3,03 \text{ t.}$$

D'après le doc 3, à l'aide de la norme Euro 6, une voiture diesel ne doit pas émettre au-delà de 4,5 mg de particules fines par kilomètre. Donc en une année, une voiture diesel ne devrait pas émettre plus de $m_p = 4,5 \times 25\,000$ soit $1,1 \times 10^5 \text{ mg}$, ce qui correspond à environ 100 g de particules fines.

La masse de CO_2 émise en une année par une voiture diesel est gigantesque et la masse de particules fines est infime par rapport à la masse de CO_2 , mais a des conséquences très néfastes sur la santé.

4. Les particules fines sont émises notamment par les voitures diesel. D'après le graphique du doc 2, on voit que lorsque la concentration en particules fines augmente, les appels à SOS médecins pour des symptômes respiratoires augmentent. Une augmentation de $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ de $\text{PM}_{2,5}$ dans l'atmosphère engendre une augmentation de 5 à 10 % d'appels supplémentaires à SOS médecins. En étudiant le diagramme du doc 2, on note qu'une augmentation de $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ de particules fines dans l'atmosphère est à l'origine de l'augmentation de la mortalité de 1,1 % pour des causes respiratoires et de 0,6 % pour des causes cardio-vasculaires.

D'autre part, le monoxyde d'azote au contact du dioxygène donne du dioxyde d'azote. Une augmentation de $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ de dioxyde d'azote dans l'atmosphère entraîne une augmentation de la mortalité de 0,9 % toutes causes confondues.

On peut donc conclure que les produits issus directement ou indirectement de la combustion du gazole (particules fines, dioxyde d'azote) entraînent une augmentation des problèmes respiratoires ou cardiovasculaires pouvant aller jusqu'à la mort.

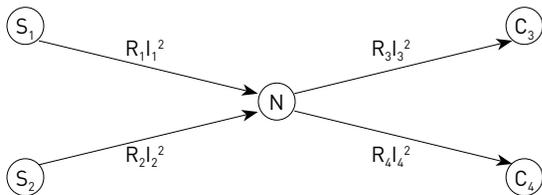
5. À chaque norme Euro, les masses maximales de polluants par kilomètre émis par les véhicules, notamment à moteur diesel (oxydes d'azote, hydrocarbures et NO_x , particules fines) sont réduites. En effet, ces produits sont néfastes voire mortels pour la santé. C'est donc la raison pour laquelle la dédieselisation du parc automobile français est une priorité du gouvernement.

Sujet 3 p. 264-265

1. Minimisation des pertes en lignes

1. Les pertes en lignes doivent être minimisées car sans cela les sources d'énergie devraient délivrer une puissance trop importante ou les destinataires n'auraient pas la puissance adaptée à leur consommation. Les pertes en lignes sont dues au passage du courant électrique dans les lignes électriques qui s'échauffent; ce phénomène porte le nom d'effet Joule.

2.



3. a. $I_{1\max} = \frac{P_{1\max}}{U_1}$ d'où $I_{1\max} = \frac{9\,000}{250}$ soit $I_{1\max} = 36,0\text{ A}$.

$I_{2\max} = \frac{P_{2\max}}{U_2}$ d'où $I_{2\max} = \frac{17\,000}{420}$ soit $I_{2\max} = 40,5\text{ A}$.

$I_3 = \frac{P_3}{U_3}$ d'où $I_3 = \frac{6\,000}{230}$ soit $I_3 = 26,1$.

$I_4 = \frac{P_4}{U_4}$ d'où $I_4 = \frac{18\,000}{400}$ soit $I_4 = 45,0\text{ A}$.

b. Au nœud intermédiaire N, on peut appliquer la loi des nœuds qui s'écrit : $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ d'où $I_2 = I_3 + I_4 - I_1$.

4. Dans l'expression $f(x) = (R_1 + R_2)x^2 - 2R_2(I_3 + I_4)x + R_2(I_3 + I_4)^2$, on remplace R_1, R_2, R_3, R_4, I_3 et I_4 par leurs valeurs respectives, ce qui donne :

$f(x) = (0,5 + 0,4)x^2 - 2 \times 0,4(26,1 + 45,0)x + 0,4 \times (26,1 + 45,0)^2$

soit $f(x) = 0,9x^2 - 56,88x + 2\,022,08$.

5. a. À l'aide de l'expression mathématique de $f(x)$ trouvée précédemment, on calcule $f(x)$ pour chaque valeur de x_{\min} donnée dans le doc 2. La valeur de x_{\min} qui convient pour la fonction proposée sera celle pour laquelle $f(x)$ aura la valeur la plus faible.

Pour $x_{\min} = 25,0\text{ A}$, on obtient $f(25,0) = 1\,162,58$.

Pour $x_{\min} = 28,6\text{ A}$, on obtient $f(28,6) = 1\,131,48$.

Pour $x_{\min} = 31,6\text{ A}$, on obtient $f(31,6) = 1\,123,38$.

La valeur la plus petite de $f(x)$ est $1\,123,38$, donc $x_{\min} = 31,6\text{ A}$ convient pour la fonction proposée. La fonction f_3 est bien celle qui passe par le minimum qui a la plus petite valeur d'après le doc 2.

b. $I_1 = 31,6\text{ A}$; $31,6\text{ A}$ est bien inférieure à $I_{1\max} = 36,0\text{ A}$.

$I_2 = 26,1 + 45,0 - 31,6$ soit $I_2 = 39,5\text{ A}$. $39,5\text{ A}$ est bien inférieur à $I_{2\max} = 40,5\text{ A}$.

Les valeurs trouvées pour I_1 et I_2 sont donc plausibles.

c. Les puissances minimales perdues ont pour expressions respectives :

$P_{\text{pertes1}} = R_1 I_1^2$ et $P_{\text{pertes2}} = R_2 I_2^2$.

$P_{\text{pertes1}} = 0,5 \times 31,6^2$ soit $P_{\text{pertes1}} = 500\text{ W}$.

$P_{\text{pertes2}} = 0,4 \times 39,5^2$ soit $P_{\text{pertes2}} = 628,9\text{ W}$.

2. Les mélanges bleus et le réchauffement climatique

1. La température a augmenté dans la région de Montpellier de 2°C en 44 ans soit de $0,045^\circ\text{C} \cdot \text{an}^{-1}$. Il y a donc réellement dans cette région un réchauffement climatique.

2. À partir de webcams installées dans les nichoirs, compter le nombre d'œufs, le nombre d'œufs éclos, le nombre de juvéniles qui prennent leur envol, la date de ponte, la date d'éclosion, la fréquence du nourrissage et tout ceci en fonction de la température et des phénomènes météorologiques extrêmes sur une période importante.

3. a. Pour les années d'évènement climatique extrême (graphique a), plus la nichée est pondue tôt, plus son succès reproducteur est important (exemple : si la couvée est pondue 3 jours plus tôt que la moyenne elle a un succès reproducteur de 1,2 alors que si elle est pondue 3 jours plus tard, elle a un succès reproducteur de 0,8). Quand il n'y a pas d'évènement climatique extrême (graphique b), il n'y a aucun succès reproducteur apporté par la date de ponte.

b. La comparaison des deux graphiques permet de rendre compte que la date de ponte n'a d'effet sur le succès reproducteur que s'il y a eu des journées extrêmement chaudes pendant la période de nidification.

c. La présence de journées extrêmement chaudes pendant la nidification a donc un impact sur le succès reproducteur des mésanges : plus les couvées sont pondues tôt plus le succès reproducteur est important. Le réchauffement climatique induit une augmentation des journées extrêmement chaudes, les mésanges dont la ponte est plus précoce vont donc avoir un avantage reproducteur.

Sujet 4 p. 266-267

1. La cellule photovoltaïque

1. Les bonnes réponses sont celles données en a et c.

2. La lampe doit rester à la même distance de la cellule afin que l'éclairement ne varie pas. On cherche la valeur de la résistance pour laquelle la cellule est utilisée dans les conditions optimales. On règle la valeur de la résistance et on mesure l'intensité du courant sortant de la cellule et la tension à ses bornes (ou aux bornes de la « résistance »). Les résultats obtenus pour U et I ne pourraient être utilisés si l'éclairement variait.

3. a. La puissance électrique aux bornes d'un dispositif électrique est donnée par la relation $P = U \times I$ où U est la tension aux bornes du dispositif en volts (V), I l'intensité du courant parcourant le dispositif en ampères (A). La puissance électrique est alors exprimée en watts (W).

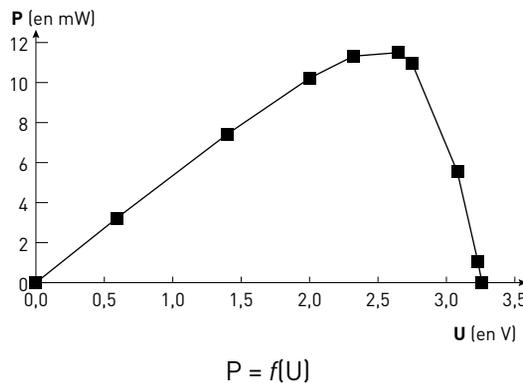
Si la tension est exprimée en volts et l'intensité du courant en milliampères, la puissance électrique sera donnée en milliwatts.

b. Les résultats obtenus pour les différentes puissances sont donnés dans le tableau ci-dessous.

U (en V)	I (en mA)	P (en mW)
0	5,54	0
0,59	5,46	3,22
1,40	5,31	7,43
2,00	5,11	10,22
2,32	4,88	11,32
2,65	4,34	11,50

2,75	3,98	10,95
3,08	1,80	5,54
3,23	0,328	1,06
3,26	0	0

c. La puissance électrique P en fonction de la tension U aux bornes de la cellule (ou de la « résistance ») est représentée ci-dessous.



4. a. D'après la représentation graphique tracée ci-dessus, la puissance maximale est obtenue pour $U = 2,75$ V. On déduit de la représentation graphique donnée dans le document que l'intensité I correspondant à la tension $U = 2,75$ V est $I = 4,0$ mA.

b. La loi d'Ohm pour un conducteur ohmique s'écrit : $U = R \times I$ d'où $R = \frac{U}{I}$ soit $R = \frac{2,75}{4,0 \times 10^{-3}}$ donc R est de l'ordre de 690Ω .

5. La valeur de la résistance dépend des valeurs de la tension U à ses bornes et de l'intensité du courant I la parcourant. La valeur de R déterminée est celle pour laquelle la puissance électrique est maximale. La valeur de R doit donc être choisie pour que la cellule soit utilisée dans les conditions optimales.

2. Les innovations évolutives des Australopithèques

1. Les documents 1 et 2 permettent d'identifier certaines innovations crâniennes et mandibulaires de la lignée humaine par comparaison d'*Homo sapiens* et du chimpanzé, ce dernier n'appartenant donc pas à cette lignée.

On observe chez l'espèce humaine une capacité crânienne importante de $1\,500\text{ cm}^3$, un trou occipital centré, une face aplatie et une mandibule parabolique.

On observe chez l'Australopithèque une capacité crânienne faible de 450 cm^3 , la même que celle observée chez le chimpanzé, un trou occipital qui progresse vers l'avant, la face présente un prognathisme, la mandibule est en « U ».

On remarque que l'Australopithèque présente des caractères ancestraux et des innovations évolutives, cependant la position du trou occipital permet de déduire qu'il est bipède. Malgré sa bipédie imparfaite, on peut conclure que l'Australopithèque appartient à la lignée humaine.

2. On peut qualifier d'exponentiel le modèle de croissance des deux courbes.

3. Une courbe est en fait un modèle et peut donc être considérée comme une moyenne, ainsi certains points ne sont pas sur la courbe.

4. On constate que les Australopithèques ont des

flux sanguins entrants plus faibles que ceux des chimpanzés et des gorilles actuels. En se basant exclusivement sur ces résultats, on pourrait conclure que les Australopithèques n'appartiennent pas à la lignée humaine. Une ancienne idée plaçant les Australopithèques comme des stades intermédiaires entre l'intelligence du « singe » et la nôtre est donc à proscrire.

5. Par lecture graphique, on observe qu'il y a environ 1,3 Ma, la différence de flux sanguin entre les deux lignées a dépassé les $2 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui correspond aux *Homo erectus*.

6. Même s'il faut prendre ces interprétations avec beaucoup de prudence, il ne faut pas conclure que les Australopithèques et même les premiers *Homo* étaient plus « intelligents » que les gorilles actuels. Le vrai saut évolutif semble dater d'*Homo erectus*.

FICHES MATHS

Manuel p. 272-285

Fiche 1. Puissances de 10

p. 272

Exercice 1

$E = 1,7 \times 10^{17} \times 365 \times 24 \times 3\,600$ soit $E = 5,4 \times 10^{24}$ J.
5,4 étant supérieur à 5, l'ordre de grandeur de l'énergie reçue sur Terre chaque année a pour ordre de grandeur 10^{25} J.

Exercice 2

$$I = \frac{P}{U} \text{ donc } I = \frac{500 \times 10^6}{20 \times 10^3} \text{ soit } I = 2,5 \times 10^4 \text{ A.}$$

2,5 étant inférieur à 5, l'ordre de grandeur de l'intensité du courant est 10^4 A.

Exercice 3

$N = 4\,000 \times 3\,000$ soit $1,2 \times 10^7$ pixels.

1,2 étant inférieur à 5, l'ordre de grandeur du nombre de pixels dans l'image est de 10^7 pixels.

Fiche 2. Conversions d'unités

p. 273

Exercice 1

- a. $\Delta e = 0,65 \text{ m} = 65 \text{ cm} = 650 \text{ mm}$
- b. $P = 6 \text{ mW} = 0,006 \text{ W} = 6 \times 10^{-3} \text{ W}$
- c. $d = 2,5 \mu\text{m} = 0,000\,002\,5 \text{ m} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m}$
- d. $S = 1\,830\,000 \text{ km}^2 = 1\,830\,000\,000\,000 \text{ m}^2$
 $S = 1,830 \times 10^{12} \text{ m}^2$

Exercice 2

- a. $E = 4,18 \times 10^{10} \text{ J} = 41,8 \text{ GJ}$
- b. $m = 4,6$ milliards de tonnes $= 4,6 \times 10^9$ tonnes
 $m = 4,6 \text{ Gt}$
- c. $d = 7 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,7 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,7 \text{ mm}$
- d. $P = 2\,760 \text{ MW} = 2,760 \times 10^9 \text{ W} = 2,760 \text{ GW}$

Fiche 3. Chiffres significatifs et notion d'incertitude

p. 274

Exercice 1

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ d'où } V = \frac{m}{\rho}.$$

$$V = \frac{2,19 \times 10^{14}}{917} \text{ soit } V = 2,39 \times 10^{11} \text{ m}^3.$$

Le résultat du quotient doit comporter 3 chiffres significatifs car chacune des données en comporte 3.

Exercice 2

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P = 536 + 935,5 + 134,25 + 1\,015 \text{ soit } P = 2\,621 \text{ W.}$$

Le résultat de l'addition ne doit pas comporter de décimale car deux données n'en comportent pas.

Exercice 3

- a. 2
- b. 4
- c. 1
- d. 2

Exercice 4

- a. 2
- b. 2
- c. 3
- d. 4

Fiche 4. Intervalle de confiance

p. 275

Exercice 1

$$\text{a. On a } f = \frac{157}{400} = 0,3925 \text{ et } \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{400}} = 0,05.$$

L'intervalle de confiance à 95 % est donc [0,3425; 0,4425].

$$\text{b. On a } f = \frac{1\,037}{2\,500} = 0,4148 \text{ et } \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{2\,500}} = 0,02.$$

L'intervalle de confiance à 95 % est donc [0,3948; 0,4348].

Exercice 2

$$\text{a. On a } f = \frac{904}{2\,000} = 0,452 \text{ et } \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{2\,000}} \approx 0,022.$$

L'intervalle de confiance à 95 % est donc [0,43; 0,474].

b. Si une pièce n'est pas truquée, la fréquence moyenne du nombre de Pile est 0,5. Plus la taille de l'échantillon est grande, plus on s'approche de cette fréquence moyenne. Dans l'expérience proposée, l'échantillon est grand et 0,5 n'appartient pas à l'intervalle de confiance à 95 %. On peut donc affirmer que la pièce est probablement truquée.

Exercice 3

On a $f = \frac{86}{244} \approx 0,352$ et $\frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{244}} \approx 0,064$.

L'intervalle de confiance à 95 % est donc [0,288; 0,416].

Fiche 5. Pourcentage, taux de variation

p. 276

Exercice 1

12,5 % de 30 = $\frac{12,5}{100} \times 30 = 3,75 \approx 4$. Il y a 4 élèves qui suivent la spécialité mathématiques.

Exercice 2

Il y a 24 QCM sur 50 questions, soit $\frac{24}{50} = 0,48 = 48$ %.

Exercice 3

Le taux de variation est $\frac{42 - 32}{32} = 0,3125 = 31,25$ %.
L'article a subi une hausse de 31,25 %.

Exercice 4

Le prix du sac a baissé de 30 % : on multiplie son prix par $1 - 30\% = 1 - \frac{30}{100} = 0,7$. Son nouveau prix est donc de 31,5 €.

Fiche 6. Estimer l'aire d'une surface

p. 277

Chaque carreau a pour aire 4 m².

La zone située en haut à gauche de l'image contient environ 549 carreaux pleins et 48 carreaux traversés par la route. L'aire est donc comprise entre $549 \times 4 = 2\,196$ m² et $(549 + 48) \times 4 = 2\,388$ m².

La zone située en bas à gauche de l'image contient environ 314 carreaux pleins et 48 carreaux traversés

par la route. L'aire est donc comprise entre $314 \times 4 = 1\,256$ m² et $(314 + 48) \times 4 = 1\,448$ m².

La zone située à droite de l'image contient environ 500 carreaux pleins et 31 carreaux traversés par la route. L'aire est donc comprise entre $500 \times 4 = 2\,000$ m² et $(500 + 31) \times 4 = 2\,124$ m².

Fiche 7. Inférence bayésienne

p. 278

Exercice 1

Supposons que le test ait eu lieu sur 10 000 personnes. On aurait alors le tableau suivant.

	Malade	Sain	Total
Test positif	9	300	309
Test négatif	1	9 690	9 691
Total	10	9 990	10 000

Il y a 309 personnes qui sont positives au test et 9 personnes malades.

La probabilité d'être malade sachant que le test est positif est donc $\frac{9}{309} \approx 2,9$ %.

Exercice 2

Supposons que le logiciel anti-spam ait traité 10 000 mails. On aurait alors le tableau suivant.

	Spams	Légitimes	Total
Considéré comme spam	49	199	248
Considéré comme légitime	1	9 751	9 752
Total	50	9 950	10 000

Il y a 248 mails considérés comme spams et 49 sont réellement des spams.

La probabilité d'être un spam sachant que le mail a été détecté comme un spam par le logiciel est donc $\frac{49}{248} \approx 19,8$ %.

Fiche 8. Manipuler des grandeurs produit ou quotient, grandeurs proportionnelles

p. 279

Exercice 1

a. P_j et R sont des grandeurs proportionnelles entre elles.

b. I et P sont des grandeurs proportionnelles entre elles.

c. E et C sont des grandeurs proportionnelles entre elles.

d. U et E sont des grandeurs proportionnelles entre elles.

Exercice 2

a. $R = \frac{P_j}{I^2}$ d'où $R = \frac{125}{3,0^2}$ soit $R = 14 \Omega$.

b. $U = \frac{P}{I}$ d'où $U = \frac{1\,500}{6,5}$ soit $U = 231 \text{ V}$.

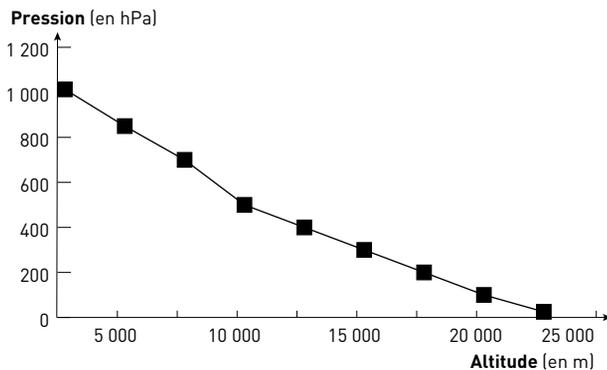
c. $C = \frac{2E}{U^2}$ d'où $C = \frac{2 \times 12,5}{5,0^2}$ soit $C = 1,0 \text{ F}$.

d. $I = \frac{E}{U \times \Delta t}$ d'où $I = \frac{1,0 \times 10^4}{5,0 \times 30 \times 60}$ soit $I = 1,1 \text{ A}$.

Fiche 9. Construire et exploiter un graphique

p. 280

1.

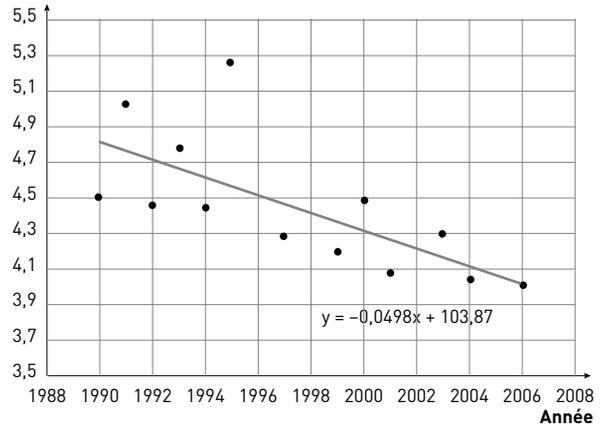


2. On peut estimer que la pression de l'atmosphère à 4 000 m est à environ 600 hPa, à 10 000 m à 280 hPa et à 13 000 m à 160 hPa.

Fiche 10. Courbe de tendance

p. 281-282

Surface de la banquise
(en millions de km²)



a. Une équation de la droite de tendance des données est $y = -0,0489x + 103,87$.

b. Si la tendance se poursuivait, on aurait eu en 2010 : $-0,0498 \times 2\,010 + 103,87 \approx 3,77$ millions de km² de banquise.

Fiche 11. Déterminer le minimum d'une fonction

p. 283

a. • Utilisation de la forme canonique

$x^2 + 2x - 15 = x^2 + 2 \times x \times 1 + 1^2 - 1^2 - 15 = (x + 1)^2 - 16$.
Le minimum de f_1 est obtenu en $x_m = -1$ et vaut -16 .

• Utilisation de la dérivée

$f_1'(x) = 2x + 2$. On a ainsi $2x_m + 2 = 0$ soit $x_m = -1$. Et $f_1(-1) = -16$.

• Utilisation des racines de f

$\Delta = 2^2 - 4 \times (-15) \times 1 = 64 = 8^2$. Les racines de f_1 sont -5 et 3 . Le minimum se trouve en $x_m = \frac{-5 + 3}{2} = -1$ et vaut $f_1(-1) = -16$.

b. • Utilisation de la forme canonique

$x^2 - 55x - 2\,000 = x^2 - 2 \times x \times 27,5 + 27,5^2 - 27,5^2 - 2\,000 = (x - 27,5)^2 - 2\,756,25$

Le minimum de f_2 est obtenu en $x_m = 27,5$ et vaut $-2\,756,25$.

• Utilisation de la dérivée

$f_2'(x) = 2x - 55$. On a ainsi $2x_m - 55 = 0$ soit $x_m = 27,5$.
Et $f_2(27,5) = -2\,756,25$.

• **Utilisation des racines de f**

$\Delta = (-55)^2 - 4 \times -2\,000 \times 1 = 11\,025$. Les racines de f_2 sont -25 et 80 . Le minimum se trouve en $x_m = \frac{-25 + 80}{2} = 27,5$ et vaut $f_2(27,5) = -2\,756,25$.

c. • **Utilisation de la forme canonique**

$$2x^2 - 12x + 8 = 2(x^2 - 6x + 4) = 2(x^2 - 2 \times x \times 3 + 3^2 - 3^2 + 4) = 2(x - 3)^2 - 10$$

Le minimum est de f_3 est obtenu en $x_m = 3$ et vaut -10 .

• **Utilisation de la dérivée**

$f_3'(x) = 4x - 12$. On a ainsi $4x_m - 12 = 0$ soit $x_m = 3$. Et $f_3(3) = -10$.

• **Utilisation des racines de f**

$\Delta = (-12)^2 - 4 \times 2 \times 8 = 80$. Les racines de f sont $3 + \sqrt{5}$ et $3 - \sqrt{5}$. Le minimum se trouve en $x_m = \frac{3 + \sqrt{5} + 3 - \sqrt{5}}{2} = 3$ et vaut $f_3(3) = -10$.