



Enseignement scientifique

Programme 2020

Livre du professeur

Sous la direction de

Thierry Cariat

Benoît Merlant

Mathieu Ruffenach

Michel Poncy

Rémi Tourret

Adeline André

IA-IPR, académie de Versailles

Thierry Cariat

Lycée Dhuoda, Nîmes

Pascal Chauvel

Lycée Charles Lepierre, Lisbonne

Philippe Cosentino

Lycée Rouvière, Toulon

Développeur d'applications scientifiques

Nicolas Courbaize

Lycée Jean Jaurès,
Saint-Clément-de-Rivière

Sébastien Gergadier

Lycée Chaptal, Paris

Catherine Lebert

Adeline Marois

Annexe du lycée Jean-Baptiste Say
Centre Édouard Rist, Paris

Benoît Merlant

Lycée Bernard Palissy, Gien

Marc Morandini

Lycée Emmanuel d'Alzon, Nîmes

Marine Paulhiac-Pison

Lycée Marie Curie, Versailles

Michel Poncy

Philippe Roger

Lycée Bernard Palissy, Gien

Mathieu Ruffenach

IA-IPR, académie de Montpellier

Laurent Toix

Lycée Aristide Maillol, Perpignan

Rémi Tourret

Lycée Marceau, Chartres
ESPE Centre Val de Loire (Université d'Orléans)

Avec la collaboration de

Denis Baude - Xavier Berthon - Alban Caillette - Isabelle Gasperini - Myriam Gaujoux - Véronique Joyeux - Yves Jusserand -
Frédéric Labaune - Pascale de Marchi - Aurélie Ménard-Parrod - Paul Pillot - Stéphane Rabouin

bordas
éditeur

Les ressources numériques du manuel

Le manuel d'enseignement scientifique Terminale est accompagné de nombreuses **ressources numériques gratuites**.

L'accès dépend de la nature de la ressource :

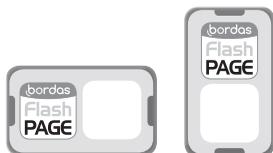
		Manuel numérique du professeur	Manuel numérique de l'élève	Site du professeur	Site de l'élève
Livre du professeur		✓		✓	
Animations, en partenariat avec  eduMedia	✓	✓	✓		
Descriptif des animations		✓		✓	
Vidéos d'expériences ou documentaires	✓	✓	✓		
Fichiers tableur		✓	✓	✓	✓
Fichiers de modélisation		✓	✓	✓	✓
Simulations	✓	✓	✓		
Liens url	✓	✓	✓		
Cours en podcast	✓	✓	✓		
Cartes mémo	✓	✓	✓		
Corrections détaillées d'exercices	✓	✓	✓	✓	✓

• Bordas Flashpage



L'application Bordas Flashpage permet d'accéder à la plupart des ressources élèves grâce à une tablette ou un smartphone.

Les ressources disponibles par Flashpage sont repérables dans le manuel grâce à ce pictogramme :



Téléchargez gratuitement l'application :



Pour accéder aux ressources indiquées sur une page du manuel, scannez **la page entière**.

• Les manuels numériques de l'élève et du professeur



Les manuels numériques contiennent toutes les ressources numériques. Seule la version professeur donne l'accès au livre du professeur.

Pour l'accès aux manuels numériques, consultez le site www.editions-bordas.fr/ rubrique Enseignant/Lycée/Offre numérique pour le lycée

• Le site ressources du professeur

espace-lycee.editions-bordas.fr

Le site ressources du professeur contient à la fois des ressources élèves et des ressources professeur.

Les ressources réservées au professeur (notamment le livre du professeur) sont protégées et ne sont accessibles que sur inscription.

• Le site ressources de l'élève

lycee.editions-bordas.fr/

Ce site est dédié aux ressources élèves, notamment les corrigés détaillés d'exercices pour les élèves qui n'auraient pas accès aux ressources par Bordas Flashpage.

• Pearltrees

Le manuel est compatible avec la plateforme pédagogique Pearltrees.

Informations sur le site www.editions-bordas.fr/ rubrique Enseignant/Lycée/Enseignement scientifique

SOMMAIRE

Partie 1 – Science, climat et société

① L'atmosphère terrestre et la vie.....	5
② La complexité du système climatique	17
③ Le climat du futur	31
④ Énergie, choix de développement et futur climatique.....	45
Vers l'évaluation commune	57

Partie 2 – Le futur des énergies

① Deux siècles d'énergie électrique	61
② Les atouts de l'électricité	69
③ Optimisation du transport de l'électricité.....	77
④ Choix énergétiques et impacts sur les sociétés.....	89
Vers l'évaluation commune	97

Partie 3 – Une histoire du vivant

① La biodiversité et son évolution.....	101
② L'évolution comme grille de lecture du monde	119
③ L'évolution humaine.....	131
④ Les modèles démographiques	143
⑤ L'intelligence artificielle	159
Vers l'évaluation commune	173

L'atmosphère terrestre et la vie

LE PROGRAMME

1. Science, climat et société

1.1 – L'atmosphère terrestre et la vie

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 ajouté 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 N_2, CO_2 et H_2O. Sa composition actuelle est d'environ 78 % de N_2 et 21 % de O_2, avec des traces d'autres gaz (dont H_2O, CO_2, CH_4, N_2O).</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>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>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>Mettre en relation la production de O_2 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>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>Interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet.</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. 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 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>
<p>Prérequis et limites</p>	
<p>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'oxydoréduction n'est attendu.</p>	

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ

■ p. 18

► SITUATION 1

Les acquis de 2^{nde} sur les métabolismes des cellules et de 1^{re} ES sur la photosynthèse à l'échelle planétaire sont mobilisés avec les échanges gazeux associés.

► Exemple de réponse attendue

Les plantes, comme l'élodée de la photographie, libèrent du dioxygène (ici visible sous forme de bulles) en présence de lumière. Cette libération témoigne de la photosynthèse, un métabolisme au cours duquel du dioxyde de carbone est absorbé. La respiration constitue un second métabolisme qui se caractérise par des échanges gazeux contraires aux précédents : rejet de dioxyde de carbone dans le milieu extérieur et absorption de dioxygène, quelles que soient les conditions lumineuses.

Complément

Ces échanges peuvent être suivis expérimentalement *via* l'utilisation d'un ordinateur et de sondes capables de mesurer les taux de dioxygène et de dioxyde de carbone et sous différentes conditions (lumière, obscurité, ajout de substances diverses, etc.).

► En classe de T^{le} enseignement scientifique

L'étude de l'histoire passée et actuelle de l'atmosphère nécessite de connaître les deux gaz évoqués ainsi que les puits et sources associés à ces derniers. Les cinq activités constitutives de ce chapitre font appel en permanence à ces notions.

► SITUATION 2

On remobilise ici des acquis du cycle 4 au travers de l'affiche d'une campagne de prévention menée afin de développer chez les jeunes enfants une attitude responsable face à l'exposition au Soleil : <https://www.cancer.be/prevention/soleil-et-uv/proteger-les-enfants/ecoles-futees-au-soleil>

►Exemple de réponse attendue

L'exposition aux rayons ultraviolets (UV) de manière intense, surtout pour les peaux claires, conduit à des coups de soleil à court terme et à des cancers de la peau (mélanomes) à plus long terme. En se protégeant avec une crème solaire, la quantité d'UV absorbée par la peau est nettement diminuée. Enfin, l'une des meilleures protections reste la non-exposition au Soleil et le port de vêtements.

Complément

En effet, les UV modifient l'organisation des molécules d'ADN des cellules de la peau et peuvent être à l'origine de mutations modifiant la bonne expression du génome. En cas d'accumulation, ces mutations peuvent aboutir à la mort cellulaire ou à un dérèglement du cycle cellulaire, les amenant à se diviser et à proliférer sous la forme de tumeurs.

►En classe de 1^{er} enseignement scientifique

L'importance de la couche d'ozone quant à la protection des êtres vivants vis-à-vis des UV sera abordée dans l'activité 4.

● SITUATION 3

Il s'agit ici de sensibiliser les élèves à l'impact des activités humaines sur la composition de l'atmosphère au travers d'un exemple d'actualité. En 2019, 89 178 foyers d'incendie ont été détectés en Amazonie brésilienne selon l'INPE (Institut national brésilien de recherches spatiales), soit 30 % de plus qu'en 2018. Cette recrudescence est essentiellement le fait de la déforestation. Ainsi, environ 6,37 Gt de CO₂ ont été libérées dans l'atmosphère en 2019 par combustion lors des différents feux de forêts dans le monde.

►Exemple de réponse attendue

Comme les végétaux arrachés sont ensuite brûlés, leur combustion rejette un supplément de CO₂ dans l'atmosphère. De plus, la disparition des végétaux ne permet plus d'absorber par photosynthèse du CO₂ atmosphérique. Pour ces deux raisons, la déforestation entraîne une augmentation du taux de CO₂ dans l'air.

Complément

L'exercice de préparation à l'épreuve des E3C n° 3 p. 100-101 traite de façon détaillée des relations entre incendies de forêts et réchauffement climatique en s'appuyant sur l'ensemble des notions travaillées au cours des trois chapitres du thème n° 1.

►En classe de 1^{er} enseignement scientifique

Le cycle biogéochimique du carbone et ses perturbations engendrées par les activités humaines sera étudié dans l'activité 5.

ACTIVITÉS

Ce chapitre est conçu sur la base chronologique de l'histoire de l'atmosphère terrestre. La formation et l'évolution précoce de l'atmosphère primitive sont abordées lors de **l'activité 1**. Puis, l'enrichissement progressif en dioxygène en interaction avec la vie est expliqué dans les **activités 2 et 3**. Cet enrichissement aboutit à la formation de la couche d'ozone stratosphérique dont le rôle vis-à-vis des êtres vivants est envisagé dans **l'activité 4**. Enfin, **l'activité 5** traite le cycle biogéochimique du carbone et ses modifications actuelles liées aux activités humaines. Ainsi, conformément au programme, les relations étroites entre l'histoire de la Terre et celle de la vie sont établies à différentes échelles de temps.

p. 20 | **ACTIVITÉ 1**

De l'atmosphère primitive à l'actuelle

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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). Le refroidissement de la surface de la Terre primitive a conduit à la liquéfaction de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère initiale. »

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

Le **document 1** permet de comprendre de manière simplifiée comment l'atmosphère primitive s'est formée, en s'appuyant sur les éléments du texte illustré par le doc. 1a et par l'image du doc. 1b illustrant la possibilité pour certaines laves de contenir des gaz.

Le **document 2** montre comment la composition de l'atmosphère primitive peut être reconstituée. Concernant l'eau, son origine n'est pas détaillée.

Erratum : l'atmosphère est composée de 78 % de N₂ et 1 % pour les autres gaz. Sera corrigé dans le manuel élève et numérique.

Remarques :

• *Seule l'idée que l'eau eut été principalement apportée sur Terre par les petits corps qui l'ont percutée au moment de sa formation est citée. Selon Bernard Marty, géochimiste à l'université de Lorraine : « L'eau de la Terre ne se serait pas formée sur notre planète même, mais aurait été héritée d'autres corps du Système solaire. » (extrait de Science et Vie, mars 2019). Un apport initial serait majoritaire et des apports plus tardifs, par des astéroïdes et des comètes riches en glace, minoritaires. Ces deux types d'apport ne sont que brièvement évoqués ici.*

• *On peut s'appuyer pour ces deux documents sur les acquis de la classe de 1^{re} enseignement scientifique concernant l'origine et l'âge de la Terre notamment les notions relatives à la formation de la Terre par accréation, puis celles associées aux météorites.*

Le **document 3** permet aux élèves de comprendre grâce au diagramme d'état de l'eau comment la liquéfaction (condensation liquide) de l'eau atmosphérique a généré les océans.

L'expérience relatée en **d.** peut être réalisée en démonstration en classe avec une cloche à vide. Du fait que nous vivons à une pression atmosphérique présentant des écarts peu perceptibles par l'organisme humain, la majorité des élèves pensent que seules les variations de température permettent à l'eau de changer d'état. C'est là une bonne occasion de leur prouver l'importance de la pression lors de ces changements. On peut observer sur cette image que l'eau est portée à ébullition (traduisant ainsi son évaporation) alors que sa température n'est que de 34,4 °C, par diminution de la pression jusqu'à 61 hPa au lieu de 1 013 hPa !

Une animation *Edumedia* sur les changements d'états de l'eau peut apporter aux élèves une aide à la compréhension.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. L'atmosphère terrestre primitive provient de la libération des gaz contenus dans les chondrites initiales ayant formé la planète ou dans celles qui ont bombardé plus tardivement la jeune planète. De plus, les enveloppes terrestres en formation, croûte et manteau, ont également subi un dégazage précoce important. Sa composition devait être voisine de celle de l'ensemble des gaz contenus dans des chondrites âgées de 4,57 Ga, c'est-à-dire de l'âge de la Terre : eau (80 %), dioxyde de carbone (12 %) et diazote (5 %) principalement.

Remarque : les valeurs ne sont pas à mémoriser par les élèves.

2. La saisie des informations dans les diagrammes circulaires des documents 2 et 3 permet de construire un tableau comparatif qui montre bien l'évolution de la composition de l'atmosphère terrestre : disparition presque totale de l'eau et du dioxyde de carbone, enrichissement relatif très important en diazote et apparition du dioxygène.

Gaz	Teneur supposée dans l'atmosphère initiale (en %)	Teneur mesurée dans l'atmosphère actuelle (en %)
H ₂ O	80	< 1
CO ₂	12	Traces (0,04)
N ₂	5	78
O ₂	Absence	21

3. Pour se condenser, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère primitive a subi une forte baisse de température et probablement de pression. Ainsi, à pression constante, lorsque la température atmosphérique a franchi la limite de 100 °C, la liquéfaction (ou condensation liquide) est devenue possible. En supposant la pression atmosphérique supérieure à celle actuelle, la liquéfaction est possible à une température supérieure à 100 °C.

Remarque : les conditions et l'époque exactes de cette condensation ne sont pas connues. Toujours selon Bernard Marty dans Les dossiers de la Recherche n° 36, août 2009 : « Pour qu'il y ait eu condensation de la vapeur d'eau, il a fallu que la température baisse beaucoup et rapidement. À l'époque, elle devait s'élever à plusieurs centaines de degrés. Car, bien que le Soleil fût paradoxalement moins puissant d'environ 25 à 30 %, l'atmosphère chargée en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone (CO₂) avait une pression plusieurs dizaines de fois supérieure à la pression actuelle au niveau de la mer et alimentait un important effet de serre. Pour que la température baisse, il a fallu que l'énergie de l'atmosphère se dissipe par rayonnement et que la pression de CO₂ baisse drastiquement... Aujourd'hui, notre seule contrainte est la date à laquelle cette condensation a dû avoir lieu : au plus 200 millions d'années après le début de la formation de la Terre, puisque la découverte des zircons australiens démontre la présence d'eau liquide après cette date. ».

4. La grande solubilité du CO₂ dans l'eau peut expliquer sa disparition de l'atmosphère primitive par dissolution dans les eaux océaniques. Au

contraire, du fait de sa solubilité beaucoup plus faible, le N_2 est resté dans l'atmosphère où sa proportion a augmenté du fait de la disparition conjointe de l'eau et du CO_2 . Reste à expliquer d'où provient le dioxygène apparu plus tardivement dans l'atmosphère.

p. 22 ■ **ACTIVITÉ 2**

L'apparition du dioxygène atmosphérique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « L'hydrosphère s'est formée, dans laquelle s'est développée la vie. 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. »

Savoir-faire : « Mettre en relation la production de O_2 dans l'atmosphère avec des indices géologiques (oxydes de fer rubanés, stromatolithes...). Ajuster les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène. »

En continuité de l'activité précédente, on s'intéresse ici à l'origine du dioxygène atmosphérique.

Le **document 1** présente les premiers organismes producteurs de dioxygène en faisant appel au principe de l'actualisme. L'existence de stromatolithes anciens (doc. 1a) suggère que leur formation est due à l'existence de cyanobactéries photosynthétiques, apparues il y a plus de 3,5 Ga (doc. 1c). L'édification des stromatolithes actuels (doc. 1b) est détaillée afin de mettre en évidence le rôle que joue la photosynthèse dans leur formation (doc. 1d).

Le **document 2** permet de comprendre le décalage temporel entre la présence de stromatolithes depuis - 3,5 Ga et l'apparition du dioxygène atmosphérique, il y a seulement - 2,4 Ga. Une expérimentation assistée par ordinateur met en évidence que des cyanobactéries actuelles (Nostoc) rejettent du dioxygène lors de la photosynthèse d'une part, et qu'un précipité ferrique apparaît par ajout d'ions Fe^{2+} (doc. 2a), parallèlement à une chute du taux de dioxygène. Les élèves pourront faire appel à la fiche technique dédiée à l'expérimentation assistée par ordinateur de la page 293 du manuel.

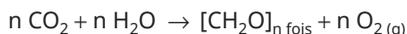
L'expérience décrite dans le doc. 2b met en évidence que le dioxygène peut se combiner avec du fer présent dans le milieu réactionnel ce qui permet d'expliquer les observations précédentes.

En transposant cette situation expérimentale actuelle à l'existence des fers rubanés (doc. 2c), roches sédimentaires formées entre - 3,5 et - 1,9 Ga, les élèves comprennent que le dioxygène a réagi avec le fer afin de les former. Une fois une grande partie du fer oxydé épuisé, le dioxygène disponible a été libéré dans l'atmosphère vers - 2,4 Ga.

Cette activité 2 est l'occasion de mener des activités pratiques concrètes : réalisation d'une préparation microscopique de Nostoc puis observation de cette dernière, réalisation d'une mesure Ex.A.O... Une fois déshydratés, les nostocs se conservent plusieurs mois voire années au laboratoire ; il suffit de les réhydrater 24 à 48 heures avant la date prévue du TP.

► Exemple de correction des pistes de travail

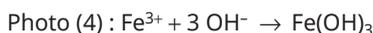
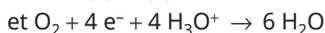
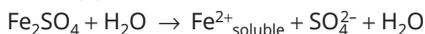
1. Le dioxygène terrestre a pour origine la vie. En effet, le dioxygène a été libéré par des cyanobactéries qui pratiquaient la photosynthèse. L'équation de ce métabolisme est la suivante :



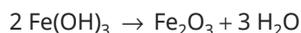
2. En absence de lumière, la quantité de dioxygène diminue dans l'enceinte de réaction : les bactéries consomment du dioxygène, cette consommation est liée à la respiration. Puis, à la lumière, la quantité de dioxygène augmente dans l'enceinte. Cette augmentation provient de la production de ce gaz par les bactéries *via* la photosynthèse puis à sa libération. Enfin, une injection unique d'une solution d'ions ferreux Fe^{2+} provoque la chute voire la disparition totale du dioxygène dans l'enceinte. La photographie montre l'existence d'un dépôt de couleur rouille dans l'enceinte. Ce précipité correspond à de l'hydroxyde ferrique $Fe(OH)_3$ ce qui explique la chute observée du taux de dioxygène ayant servi à l'oxydation du fer.

3. Les équations des réactions chimiques d'oxydation du fer par le dioxygène sont les suivantes :

Photo (1) :



L'hématite Fe_2O_3 est une forme déshydratée de l'oxyde ferrique, ce qui signifie qu'il y a eu perte d'eau soit la réaction :



4. Entre - 3,5 Ga et - 2,4 Ga, le dioxygène est libéré dans les eaux océaniques par la photosynthèse cyanobactérienne. Ces eaux sont riches en ions

Fe²⁺ qui réagissent avec le dioxygène. Des roches, les fers rubanés, se forment emprisonnant l'oxygène sous forme d'oxydes de fer et l'empêchant ainsi de passer dans l'atmosphère. Une fois les ions Fe²⁺ en grande partie épuisés dans l'océan, le dioxygène est libéré dans l'atmosphère. Les fers rubanés ne se forment plus du tout après - 1,9 Ga, ce qui correspond à une oxydation massive de l'atmosphère.

p. 24 ■ **ACTIVITÉ 3**

L'histoire du dioxygène de l'atmosphère

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Sa concentration atmosphérique actuelle (*du dioxygène*) a été atteinte il y a 500 millions d'années environ. Les sources et puits de dioxygène atmosphérique sont aujourd'hui essentiellement liés aux êtres vivants (photosynthèse et respiration) et aux combustions. »

Savoir-faire : « Mettre en relation la production de O₂ dans l'atmosphère avec des indices géologiques (oxydes de fer rubanés, stromatolithes...) ».

Cette activité est en continuité avec la précédente qui démontrait l'origine du dioxygène et son piégeage au sein des roches sédimentaires sous la forme d'oxydes de fer. On s'intéresse maintenant à son émergence dans l'air.

Le **document 1** présente les indices géologiques, roches sédimentaires et fossiles, permettant de reconstituer les grandes lignes de l'histoire du dioxygène sur Terre. On donne ici l'occasion aux élèves n'ayant que peu d'appétence pour les sciences et ses modes de communication habituels (graphiques, schémas, protocoles etc.) de s'adonner à la compréhension d'un texte qui reste toutefois richement illustré.

Remarque : certains sujets de la BNS des E3C de 1^{re} reposent sur de l'analyse de texte.

Ce document introduit les notions de puits et de source de dioxygène et prépare l'interprétation du document suivant.

Le **document 2** est un graphique qui reconstitue l'évolution de la teneur en dioxygène de l'atmosphère en fonction des informations apportées par les indices géologiques précédents à diverses époques (doc. 2a). On rappelle au travers du doc. 2b l'origine photosynthétique du dioxygène et sa faible solubilité.

Le **document 3** présente les sources et puits actuels de dioxygène accompagnés d'une estimation quantitative de ces flux. Son exploitation repose sur une lecture attentive du texte.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Le tableau comprendra la nature des formations géologiques, leurs époques de formation et les indications apportées sur la composition de l'atmosphère initiale :

Formations géologiques	Époque de formation	Présence du dioxygène dans l'océan	Présence du dioxygène dans l'air
Stromatolithes	À partir de - 3,5 Ga	+	
Poudingues avec pyrite	De - 4 à - 2,2 Ga		-
Paléosols avec uraninite	Avant - 2,2 Ga		-
Fers rubanés	De - 3,5 à - 1,9 Ga	+	
Red beds	A partir de - 2 Ga		+
Halite contenant des bulles d'air	Vers - 0,815 Ga		++ (10,9 %)
Faune abondante	0,55 Ga		++++
Animaux et plantes du Carbonifère	De - 0,36 à - 0,3 Ga		+++++ (> 35 %)

2. De - 3,5 à - 2,2 Ga, la formation de poudingues contenant de la pyrite atteste d'une absence de dioxygène atmosphérique. Parallèlement, la formation de stromatolithes prouve la production de dioxygène par des cyanobactéries dans les océans, dioxygène servant à l'oxydation du fer des gisements de fers rubanés. À partir de - 1,9 Ga, les fers rubanés ne se forment plus contrairement aux Red beds qui apparaissent : une partie du dioxygène produit dans les océans par photosynthèse bactérienne est libérée dans l'atmosphère. Progressivement, ce gaz s'accumule. Le développement d'une faune abondante vers - 0,55 Ga indique une accumulation importante de dioxygène atmosphérique.

3. Actuellement, la photosynthèse est la source essentielle de dioxygène à l'échelle de la planète alors que la respiration en est le puits principal. Les échanges que ces deux métabolismes assurent entre l'atmosphère et la biosphère continentale (80 Gt par an) d'une part, la biosphère marine et l'océan (35 Gt par an) d'autre part, sont équilibrés. Par ailleurs, les transferts directs entre atmosphère et océans par dissolution et entre océans et atmosphère par dégazage (4 480 Gt par an) sont eux aussi équilibrés. Seules les combustions prélèvent 40 Gt par an de O₂ dans l'air. Comme ce dernier en contient $1,2 \cdot 10^6$ Gt, le prélèvement annuel est donc de $\frac{40 \times 100}{1,2 \times 10^6}$ soit 0,0033 %. On peut donc considérer que la teneur de l'air en dioxygène est stable.

p. 26 ■ ACTIVITÉ 4

La couche d'ozone protège la vie

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. »

Savoir-faire : « Interpréter des spectres d'absorption de l'ozone et de l'ADN dans le domaine ultraviolet. »

Cette activité présente un enjeu environnemental majeur associé notamment au « trou » de la couche d'ozone, sujet d'actualité puisque un autre amincissement a été découvert en Avril 2020 au pôle Nord.

Le **document 1** permet de définir et localiser la couche d'ozone (doc. 1b). On cherchera à faire comprendre que le terme « trou » est des plus inapproprié pour décrire ce phénomène d'amincissement de la couche d'ozone (doc. 1a).

Le doc. 2b localise la base *Antarctique Palmer* dont il est question dans le doc. 3d.

Remarque : afin de suivre l'évolution du « trou » dans la couche d'ozone au quotidien et d'obtenir des informations sur cette dernière, consulter le site de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) :

<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>

Le **document 2** explique la formation de la couche d'ozone (une animation *Edumedia* facilitera la compréhension des élèves) qui résulte d'un équilibre entre création et destruction de l'ozone au sein de la stratosphère. Le doc. 2b permet de bien différencier l'ozone stratosphérique de l'ozone troposphérique formé par la pollution (phénomène abordé dans le chapitre 4 de ce thème).

Remarque : le site de Météo France apporte des informations complémentaires :

<http://education.meteofrance.fr/dossiers-thematiques/l-evolution-du-climat/les-effets-de-la-couche-d-ozone/les-effets>

Le **document 3** présente les caractéristiques essentielles du rayonnement UV (doc. 3a), son absorption partielle par l'atmosphère et l'ADN (doc. 3b) ainsi que les effets délétères des UV sur l'ADN des êtres vivants (doc. 3c). L'index UV est présenté. On peut constater dans le doc. 3d les conséquences de l'amincissement de la couche d'ozone en montrant que l'index UV de la base *Palmer* au printemps sur la période 1990-2006 est multiplié par deux par rapport à la période 1978-1980 et est même supérieur à celui de la Californie.

On démontre ainsi le rôle de l'ozone dans la protection des êtres vivants vis à vis des UV.

Des informations sur l'échelle d'intensité du Soleil ou indice UV, qui va de 0 à 16, et les consignes à respecter suivant son type de peau sont disponibles ici.

https://www.cancer.be/sites/default/files/uvtypepeau_FR.pdf

► Exemple de correction des pistes de travail

1. La couche d'ozone est localisée dans la stratosphère entre 15 et 35 km d'altitude avec une abondance maximale vers 25 km.

2. Le gaz dioxygène O_2 se dissocie en permanence et lentement sous l'effet des ultraviolets (UV) d'une longueur d'onde de 240 nm en atomes libres d'oxygène O . Ces derniers se recombinaient rapidement avec des molécules de dioxygène et forment ainsi de l'ozone O_3 . Puis, l'ozone se dissocie lentement en dioxygène et atomes libres d'oxygène sous l'effet des UV de 290 nm de longueur d'onde. La couche d'ozone, bien que toujours présente, se construit et se déconstruit en permanence.

3. La couche d'ozone absorbe tous les UV dont les longueurs d'onde sont inférieures à 300 nm environ (graphique) donc tous les UVC et les UVB jusqu'à 300 nm (tableau). L'ADN absorbe lui les UVB de manière décroissante depuis 280 à 315 nm. Ainsi, la couche d'ozone constitue une protection efficace contre les UVB de faible longueur d'onde, les plus absorbés par l'ADN. En revanche, les UVA sont absorbés par l'ADN entre 315 et 330 nm et la couche d'ozone ne les arrête pas, donc ne nous protège pas contre eux.

Un amincissement de la couche d'ozone réduit cette protection qu'il s'agisse des UVB ou des UVC. Ainsi, en Antarctique (*Base Palmer*), l'index UV moyen 1990-2006 est le double au printemps de ce qu'il était en 1978-1980 avant l'existence de cet amincissement. Il devient même supérieur à celui de la Californie pour la même saison. Cela se traduit par une augmentation des lésions de l'ADN des cellules de la peau et probablement, par une augmentation des cancers cutanés.

4. En cas d'index UV élevé, on peut appliquer les conseils formulés dans la situation 2 page 18 sur l'affiche de la campagne de prévention « Futé au Soleil » ou ceux donnés dans la courte vidéo de Météo France : pas d'exposition aux heures les plus chaudes, crème solaire, chapeau, etc.

p. 28 ■ **ACTIVITÉ 5**

Le cycle biogéochimique du carbone

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. 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. »

Savoir-faire : « 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. »

Le **document 1**, conformément au programme, est un schéma du cycle du carbone qui devra être analysé par les élèves. Les valeurs présentées sont issues essentiellement du 5^e rapport du GIEC et de la synthèse de diverses autres sources. Elles ne sont bien sûr qu'indicatives et correspondent à la période préindustrielle, considérée ici comme antérieure à 1850 (bien que le GIEC considère le début de la période industrielle comme ayant eu lieu en 1750, les différences atmosphériques entre ces deux dates restent minces).

Une animation *Edumedia* vient aider les élèves à la compréhension du document.

La construction n'est pas demandée mais la mise en évidence des réservoirs et des flux peut être réalisée qualitativement en TP sous forme d'ateliers « tournants ». De même, un modèle numérique peut être construit avec le logiciel gratuit de modélisation *Vensim*. Il permettra d'étudier les conséquences des rejets anthropiques de CO_2 sur le cycle du carbone. Pour ce faire, vous pouvez consulter : http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/CCCIC/activiteCycle/modelisation_climatique

Le **document 2** illustre la lente et rare formation des roches carbonées (doc. 2a), la place qu'elles occupent au sein des autres sources d'énergie utilisées (doc. 2b) et enfin la projection de leur utilisation future (doc. 2). En mettant en regard la vitesse de formation de ces combustibles fossiles et celle de leur utilisation, les élèves comprennent que ce sont des énergies dites non renouvelables.

On peut ici s'appuyer sur les connaissances acquises en classe de 1^{re} enseignement scientifique.

On précise qu'1 tonne équivalent pétrole (tep) de pétrole contient approximativement 1 tonne de carbone. Par ailleurs, 1 tonne de carbone correspond à 3,67 t de CO_2 .

Vérifier ses connaissances

1 Questions à réponse unique

A-3

D'après les données issues du dégazage par chauffage de météorites chondritiques, l'atmosphère initiale était en effet constituée de 80 % de vapeur d'eau, de 12 % de dioxyde de carbone, de 5 % de diazote et de 3 % d'autres gaz.

B-4

Le dioxygène a pour origine essentielle la photosynthèse pratiquée par les organismes chlorophylliens. Ceci explique son absence au début de l'histoire de la Terre, avant que la vie n'apparaisse et ne développe cette capacité. Les plus anciens organismes connus pratiquant la photosynthèse sont datés de - 3,5 Ga : ce sont des cyanobactéries à l'origine des formations rocheuses appelées stromatolithes.

C-2

L'hydrosphère (ensemble de l'eau liquide sur Terre) et la biosphère (sphère d'échanges sur internet) ne sont pas des couches de l'atmosphère. La troposphère est la couche atmosphérique la plus basse. L'ozone y est bien présent mais en moins grande quantité que dans la stratosphère. De plus, son origine est liée à la pollution.

D-2

Le carbone est effectivement présent sous la forme de carbone organique au sein des roches carbonées (charbons, hydrocarbures) et sous la forme de carbonate de calcium au sein des roches carbonatées qui représentent de loin le stock principal de carbone.

2 Restituer les notions essentielles du cours

a. La couche d'ozone absorbe les rayons ultraviolets UVC et une grande partie des UVB, protégeant ainsi l'ADN des êtres vivants de leurs effets mutagènes délétères.

b. Le dioxygène est produit par l'activité photosynthétique d'organismes marins. Après qu'il ait oxydé la plus grande partie de fer océanique, le dioxygène a pu diffuser progressivement des océans vers l'atmosphère à partir de - 2 Ga environ.

c. L'eau constitutive des océans provient essentiellement de la liquéfaction de la vapeur d'eau de l'atmosphère primitive. Cette liquéfaction (ou condensation liquide) fut permise par le refroidissement de l'atmosphère et entraîna une baisse de sa pression atmosphérique.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Pour la période pré-industrielle (avant 1850), l'atmosphère terrestre est par ordre décroissant le 5^e réservoir terrestre de carbone. Ces réservoirs sont du plus grand au plus petit : les roches carbonatées (20 à 80×10^6 Gt), les océans (38 000 Gt), les roches carbonées (1 500 à 27 000 Gt), la biosphère continentale et les sols (500 à 3 000 Gt), l'atmosphère (590 Gt) et la biosphère marine (3 Gt). En ne considérant que les flux naturels de carbone entre l'atmosphère et les autres réservoirs, la quantité de carbone atmosphérique est constante. En effet, 169,1 Gt de carbone rentrent dans l'atmosphère (0,2 + 107,2 + 61,7) alors que la même quantité en sort (0,2 + 108,9 + 60) au cours d'une année.

2. En revanche, les activités humaines ont injecté en 2017 environ 12 Gt de carbone dans l'atmosphère, ce qui accroît le volume de ce réservoir. En augmentant ainsi annuellement la quantité de carbone contenu dans l'atmosphère, les activités humaines auront pour conséquence d'augmenter l'effet de serre exercé par l'atmosphère.

Remarque : on montrera au cours du chapitre 3 qu'une partie de ces rejets sont réabsorbés par notre environnement (activité 2). Actuellement, l'atmosphère contient environ 900 Gt de C.

3. La formation des combustibles fossiles requiert plusieurs dizaines de millions d'années (doc. 2). Chaque année (doc. 1), la fossilisation de la matière organique (d'origine océanique et continentale) est évaluée à 1,5 Gt soit, au mieux, un renouvellement annuel de 1/1000^e de ce réservoir (1,5 Gt ajoutées sur 1 500 déjà contenues). Cette formation ne compense pas, et de loin, les quantités utilisées annuellement de combustibles fossiles, 12 Gt équivalent pétrole, ce qui correspond à peu près à 12 Gt de carbone. En comparant la formation annuelle, + 1,5 Gt, à la consommation, - 12 Gt, on se rend compte que les combustibles fossiles sont des énergies non renouvelables à l'échelle humaine.

4. Le problème posé à l'humanité est que ces énergies fossiles, selon la projection présentée (doc. 2c), seront totalement consommées en 2200, c'est-à-dire en 350 ans après le début de leur utilisation massive (alors qu'elles représentent 78 % de nos ressources mondiales en 2018). La solution est donc de développer la production d'énergies dites renouvelables : biomasse, hydraulique, éolien et solaire voire géothermie.

Remarque : le site Observ'ER (L'observatoire des énergies renouvelables) fait le point sur ces énergies renouvelables http://www.energies-renouvelables.org/energies_renouvelables.asp

d. Ces combustibles fossiles sont des ressources non renouvelables car leur formation requiert des millions d'années alors que leur consommation sera totale en quelques centaines d'années. Elles représentent en effet plus de 80 % de nos sources d'énergie.

3 Avoir un regard critique

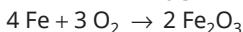
a. La composition de l'atmosphère est différente depuis sa formation, elle s'est notamment enrichie en dioxygène et appauvrie en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau. Cette dernière a en grande majorité disparu de l'atmosphère par liquéfaction entraînant avec elle le dioxyde de carbone par dissolution. Celui-ci a par ailleurs été absorbé par les organismes photosynthétiques producteurs de dioxygène.

b. La photosynthèse produit et libère du dioxygène dans l'atmosphère, c'est donc une source.

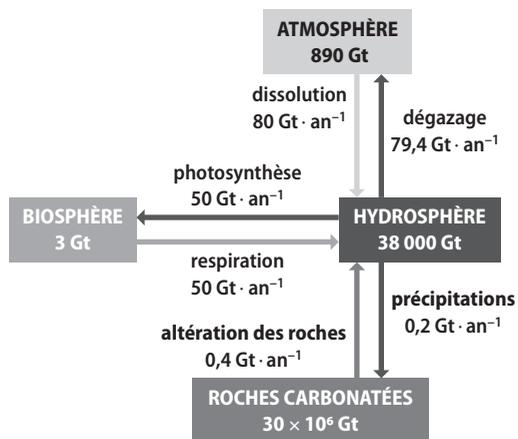
c. Les premiers organismes photosynthétiques sont des cyanobactéries âgées de - 3,5 Ga soit - 3 500 Ma et non 350 Ma. Il s'agissait de cyanobactéries à l'origine des stromatolithes.

d. La stratosphère contient la « couche d'ozone », mais de l'ozone issu de la pollution est ponctuellement présent au sol. Cet ozone se concentre notamment sous la forme de brouillards urbains appelés « smog » sous certaines conditions météorologiques (absence de vents, fortes chaleurs).

e. Si l'équation proposée était juste, il y aurait 6 électrons libérés par le fer mais 12 seraient nécessaires pour réduire les 3 molécules de dioxygène présentes (4 électrons par molécule de dioxygène). Il faut donc doubler le nombre d'atomes de fer dans l'équation pour fournir suffisamment d'électrons au dioxygène soit :



4 Analyser un schéma



La variation annuelle du stock de carbone de l'hydrosphère est le bilan des entrées :

$$80 + 50 + 0,4 = 130,4 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1} \text{ et des sorties :}$$

$$79,4 + 50 + 0,2 = 129,6 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1} \text{ soit un gain de } 130,4 - 129,6 = 0,8 \text{ Gt} \cdot \text{an}^{-1}.$$

5 Retour sur les problématiques

• **Comment la vie peut-elle influencer la composition de l'atmosphère depuis son origine jusqu'à aujourd'hui ?**

La vie a modifié la composition de l'atmosphère primitive en l'enrichissant progressivement en dioxygène, gaz dont elle était dépourvue. Des cyanobactéries photosynthétiques ont libéré du dioxygène dans les océans dès - 3,5 Ga, puis ce dernier a rejoint l'atmosphère vers - 2,4 Ga où il s'est accumulé depuis. Ce processus est aussi à l'origine du piégeage d'une partie du dioxyde de carbone (CO_2) sous la forme de roches carbonatées et carbonatées. Aujourd'hui, l'Homme influence à son tour la composition de l'atmosphère en relâchant d'importantes quantités de CO_2 issues de l'utilisation des combustibles fossiles.

• **En quoi l'atmosphère protège-t-elle les êtres vivants ?**

L'atmosphère protège les êtres vivants des effets mutagènes des rayons ultraviolets (UV) par sa « couche d'ozone ». Située dans la stratosphère, cette dernière absorbe les UVC et la majorité des B, évitant ainsi leurs effets mutagènes sur l'ADN. Sans ozone, la vie n'aurait pu coloniser les continents.

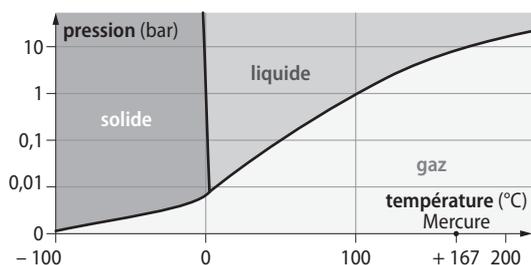
• **Quelles sont les conséquences des échanges de carbone entre l'atmosphère et les autres enveloppes de la Terre ?**

Atmosphère et biosphère sont tous les deux des réservoirs de carbone, sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4) dans l'atmosphère, et de carbone organique au sein de molécules complexes pour la biosphère. Ces deux réservoirs s'échangent en permanence du carbone sous l'effet de phénomènes tels que la respiration, la photosynthèse ou encore les combustions. Une part du carbone de la biosphère est stockée sur le long terme au sein des roches sous la forme de combustibles fossiles ou de roches carbonatées issues de l'accumulation de squelettes calcaires. Le CO_2 étant un gaz à effet de serre, ces échanges influencent sa teneur donc la température terrestre.

Exercice similaire

7 De la glace d'eau sur Mercure !

En reportant sur le diagramme de phase de l'eau les valeurs moyennes de la pression atmosphérique (environ 0 bar) et de la température de Mercure (+ 167 °C), on constate que l'eau ne pourrait y être présente qu'à l'état de vapeur. En revanche, les zones où la glace d'eau a été trouvée sont en permanence à l'ombre, c'est-à-dire à une température de - 180 °C. Avec une pression nulle, ces conditions réalisées au pôle Nord de Mercure sont compatibles avec de l'eau sous forme solide. De plus, comme cette glace est recouverte d'un matériau agissant comme un isolant thermique, elle ne doit pas fondre.



S'entraîner

8 Les dommages causés à l'ADN par les UV

1. a. Les dommages causés à l'ADN atteignent 100 unités relatives. Pour les autres longueurs d'onde, les dommages causés par les UVB sont moindres voire nuls pour les UVA.

2. b. En moyenne, les UVC endommagent l'ADN au maximum, les UVB à 80 % et les UVA ne l'endommagent presque pas.

3. c. Les microbes contenant de l'ADN, il faut donc utiliser les UV qui l'endommagent le plus.

Informations complémentaires (<http://www.lejournaldesfluides.com/actualite/le-traitement-de-leau-par-uv-une-methode-efficace-pour-eliminer-les-micro-organismes/>). Pour que ce traitement soit possible, il faut que la qualité de l'eau soit compatible pour laisser passer les rayons UV. Les principaux paramètres à prendre en compte sont au nombre de sept. Il faut évaluer la transmittance de l'eau (c'est la transparence de l'eau au rayonnement UV émis à 254 nm), la couleur (plus une eau sera claire, plus le rayonnement UV pourra la traverser), sa turbidité (plus elle sera faible, moins le rayonnement UV émis sera freiné ou détourné de son chemin). Seront

également à prendre en compte la teneur en fer et en manganèse de l'eau, qui sont des sels métalliques pouvant précipiter sur les gaines protectrices des lampes, la teneur en matières organiques, qui peut absorber la lumière UV à 254 nm et enfin le caractère plus ou moins entartrant de l'eau.

9 Pourquoi les océans perdent-ils leur dioxygène ?

1. Le document a permet d'identifier les deux types de zones qui perdent du dioxygène. Les zones de haute mer en bleu clair soutenu d'une part (océan Pacifique surtout Ouest, océan Indien et océan Atlantique Sud près des côtes Sud-africaines) et les zones côtières en vert d'autre part (côtes Ouest et Est Nord-américaines, côte de l'Europe occidentale et côtes japonaises principalement).

2. Les zones de haute mer sont soumises à un réchauffement important de leurs eaux de surface avec une température variant de 25 à 30 °C selon les zones (document c). Or, la teneur en dioxygène de l'eau diminue progressivement avec l'abaissement de sa température (document d). À titre d'exemple, une eau à 1 °C contient deux fois plus de dioxygène qu'une eau à 30 °C, 14 mg. L⁻¹ au lieu de 7 mg. L⁻¹. On peut donc formuler l'hypothèse que c'est la hausse de température des eaux océaniques qui réduit leur teneur en dioxygène par diminution de sa solubilité dans l'eau.

Quant aux eaux côtières, on constate par exemple en Bretagne (document b) que le déversement d'engrais azoté stimule la prolifération des algues (phénomène des « marées vertes »). Après leur mort, ces végétaux sont décomposés, ce qui utilise de grandes quantités de dioxygène. On peut donc supposer que ce phénomène est responsable de la diminution de dioxygène de ces eaux sur l'ensemble des zones côtières concernées.

Sans surprise, les élèves prennent conscience que ce sont les activités humaines qui sont en cause dans les deux cas : déversement de produits chimiques issus des engrais agricoles sur les côtes, réchauffement des eaux de surface océaniques par augmentation de l'émission de gaz à effet de serre.

10 Minerais d'uranium et teneur en dioxygène atmosphérique

La présence d'uraninite en forme de boule contenue dans les gisements sédimentaires âgés de - 3,4 Ga indique une formation dans des eaux dépourvues de dioxygène. Or, si l'atmosphère de cette époque avait contenu ce gaz, celui-ci se

serait solubilisé en partie dans les eaux (« coup de pouce »). Donc, l'uraninite n'aurait pas pu se former. Ce minéral atteste donc de l'absence de dioxygène atmosphérique il y a - 3,4 Ga. De même, son absence dans des roches âgées de moins de 2,2 Ga témoigne de la présence de dioxygène atmosphérique au moins depuis cette époque. Ainsi, avec ces seules informations apportées par l'uraninite, on voit que le dioxygène atmosphérique était absent entre - 3,4 et - 2,2 Ga et n'est apparu dans l'air qu'après - 2,2 Ga.

L'uraninite a pour formule U_3O_8 , alors que la pechblende, principal minéral d'uranium, est surtout composée d'uranite UO_2 . Uraninite et pechblende se trouvent dans des milieux réducteurs sans dioxygène libre, comme les sédiments détritiques archéens.

11 Évolution de la teneur atmosphérique en CO_2 entre - 500 et - 300 Ma

1. Entre - 500 et - 300 Ma, le RCO_2 diminue de 20 à 1. Or, le RCO_2 étant le rapport moyen entre le taux de CO_2 atmosphérique de l'époque et le taux actuel, cela montre que la quantité de CO_2 atmosphérique a considérablement diminué et a atteint, momentanément, sa valeur actuelle il y a 300 Ma.

2. La photosynthèse est le métabolisme qui permet aux plantes de produire leurs molécules organiques en présence de lumière après avoir absorbé le CO_2 présent dans le milieu, ici l'atmosphère.

3. L'apparition des premières plantes sur les continents a probablement eu lieu il y a environ - 525 Ma, soit 100 Ma avant celle de *Cooksonia*, plus vieille plante fossile connue à ce jour. Cela correspond au début de la baisse de la teneur atmosphérique en CO_2 de l'époque étudiée ici. On peut donc supposer que le nombre de ces plantes grandissant, la photosynthèse est devenue quantitativement de plus en plus importante sur la planète. Ainsi, la consommation de CO_2 atmosphérique a augmenté progressivement, ce qui a

entraîné sa considérable diminution dans l'atmosphère jusqu'à - 300 Ma.

L'unique cause évoquée dans cet exercice n'est pas la seule possible. Les racines auraient contribué à l'érosion des carbonates et des silicates calciques et magnésiens, ce qui aurait entraîné un transfert du carbone contenu dans le CO_2 atmosphérique vers les roches carbonatées. Enfin, au Carbonifère, la fossilisation de la matière organique a également contribué à diminuer le taux de CO_2 atmosphérique. Afin d'en savoir plus, vous pouvez consulter :

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/co2-depuis-4ga.xml>

12 **Prépa BAC** Évolution conjointe de la vie et de l'atmosphère au Carbonifère

Au Carbonifère, le taux de dioxygène a considérablement augmenté de 12 à 33 % (document a), c'est-à-dire presque triplé. Les fossiles végétaux trouvés dans les gisements carbonifères de charbon comme les sigillaires (document c) attestent d'une végétation luxuriante à cette époque. Or, les plantes possédant la capacité de photosynthèse, ont rejeté du dioxygène dans l'atmosphère. De même, une grande partie du carbone des matières organiques produites par photosynthèse a été piégée (document e), aboutissant à la formation des vastes gisements de charbon carbonifères (document b). Ce piégeage était approximativement le double de ce qu'il est actuellement. Ainsi, par cette absence de décomposition par la respiration, du dioxygène n'a pas été consommé. L'évolution de la vie a donc influencé l'évolution du taux de dioxygène atmosphérique en l'augmentant. Inversement, cette hausse spectaculaire du taux de dioxygène a influencé la vie. En effet, des insectes fossiles de très grande taille comme *Meganeura* (document d) ont été découverts dans des mines de charbon. Ces insectes, du fait de leur système respiratoire particulier, n'ont pu se développer qu'une fois l'atmosphère déjà considérablement enrichie en dioxygène.

La complexité du système climatique

LE PROGRAMME

1. Science, climat et société

1.2 – La complexité du système climatique

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. La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...). La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines).</p>	<p>Distinguer sur un document des données relevant du climat d'une part, de la météorologie d'autre part.</p>
<p>La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures in situ et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global. Il en existe d'autres : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers...</p>	<p>Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques.</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>Identifier des traces géologiques de variations climatiques passées (pollens, glaciers). Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (date de vendanges, niveau de la mer, extension d'un glacier...).</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. 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. Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle. L'énergie supplémentaire associée est essentiellement stockée par les océans, mais également par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et 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>L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont : l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ; la décroissance de la surface couverte par les glaces et diminution de l'albédo terrestre ; le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère.</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>Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système.</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'océan a un rôle amortisseur en absorbant à sa surface une fraction importante de l'apport additionnel d'énergie. Cela conduit à une élévation du niveau de la mer causée par la dilatation thermique de l'eau. À celle-ci s'ajoute la fusion des glaces continentales. Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles.</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>
Prérequis et limites	
<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>	

► SITUATION 1

Les acquis du collège sur l'existence des grandes zones climatiques terrestres, repris en enseignement scientifique en classe de 1^{re}, sont mobilisés à l'aide ce document qui s'accompagne d'une animation *Edumedia*.

►Exemple de réponse attendue

L'étude des « bandes circulaires » autour de la Terre relève de la climatologie car les données sur les températures qui délimitent chacune d'entre elles sont des moyennes des températures annuelles acquises sur des durées longues.

►En classe de 1^{re} enseignement scientifique

L'existence d'autres grandeurs atmosphériques, outre la température moyenne, témoignant du climat sera signalée. Les différences entre climatologie et météorologie seront renforcées au cours de la 1^{re} activité.

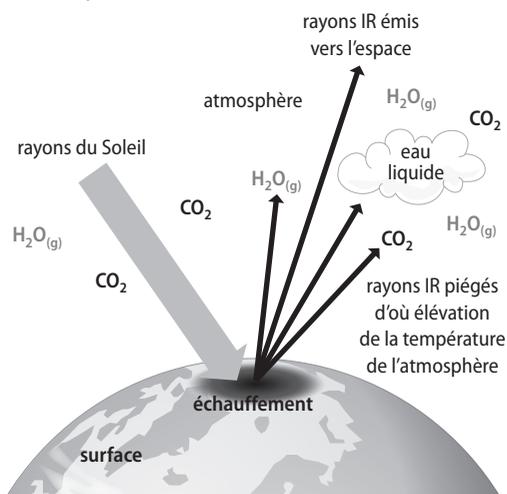
► SITUATION 2

Il s'agit ici de mobiliser les notions acquises en 1^{re} sur les gaz à effet de serre (GES). L'observation permanente par des satellites du rayonnement thermique infrarouge (IR) émis par la surface terrestre et par son atmosphère permet de le représenter pour une période donnée sous forme de carte comme celle de novembre 2018 présentée ici. Cette image provient du site de la NASA : <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov>

►Exemple de réponse attendue

La vapeur d'eau H₂O et le dioxyde de carbone CO₂ sont les deux gaz contributeurs majeurs de l'effet de serre (respectivement 48,4 % et 21,1 %).

Un exemple de schéma attendu :



►En classe de 1^{re} enseignement scientifique

La connaissance des gaz à effet de serre est requise afin de comprendre la hausse du forçage radiatif, hausse aboutissant au réchauffement climatique global. Il s'agit d'une notion fondamentale exploitée tout au long de ce chapitre et dans les suivants.

ACTIVITÉS

Après avoir clairement fait la distinction entre météorologie et climatologie, lors de l'**activité 1**, les marqueurs actuels du climat global sont répertoriés dans l'**activité 2** (évaluation et suivi de l'évolution de la température moyenne globale, surfaces glacées et niveau de la mer). D'autres indicateurs sont envisagés dans l'**activité 3** afin de prouver que le climat global présente des variabilités naturelles et ce, sur différentes échelles de temps. Néanmoins, à l'issue de ces études, les élèves doivent comprendre que jamais le taux de CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement depuis longtemps. Cette hausse induit un réchauffement climatique rapide qu'il convient d'étudier ensuite au sein de l'**activité 4**. Cette dernière remobilise les acquis fondamentaux de la classe de 1^{re} enseignement scientifique sur les notions de bilan radiatif et d'équilibre dynamique de ce bilan avant d'établir des corrélations entre l'activité humaine, l'augmentation de la teneur en GES et le réchauffement climatique. La mise en évidence des relations de causalité entre ces différents paramètres ne sera réalisée qu'au cours du chapitre 3.

L'**activité 5** est consacrée aux phénomènes de rétroactions climatiques, positives ou négatives et à leur conséquence sur l'évolution de la température moyenne globale.

Enfin, l'**activité 6** examine le rôle particulier et prépondérant joué par les océans dans le fonctionnement du système climatique terrestre ainsi que dans l'évolution du niveau marin corrélativement au réchauffement.

p. 40 ■ **ACTIVITÉ 1**

Météorologie et climatologie

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Un climat est défini par un ensemble de moyennes de grandeurs atmosphériques observées dans une région donnée pendant

une période donnée. Ces grandeurs sont principalement la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents. La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...). La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines). »

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

Les 6 grandeurs atmosphériques citées dans le programme sont présentées dans le **document 1** dans des lieux géographiquement différents. Ce choix est justifié par la volonté de montrer que ces paramètres atmosphériques sont des composants climatiques universels et de mettre ensuite les élèves dans une situation de recherche sur un exemple précis de leur choix (ville, région, pays...).

Le **document 2** présente les diverses périodes d'études du climat, qui sont au moins longues de 30 ans, ainsi que la variété des marqueurs climatiques utilisés.

Par opposition au précédent, le **document 3**, résume les objectifs de la météorologie.

Afin de faire le point sur ces deux notions, quelques références utiles :

« *Climat d'hier à demain* », Sylvie Joussaume, CNRS Éditions, 2003. *L'auteure est climatologue et a participé à la rédaction de plusieurs rapports du GIEC.*

« *Météo. Comprendre les secrets du temps* », Jacques Kessler, Éditions Balland/Jacob-Duvernoy, 1999.

Un entretien accordé à la revue « La Recherche », n° 542, décembre 2018, par Valérie Masson-Delmotte

paléoclimatologue et coprésidente du groupe 1 du GIEC, intitulé « Chaque demi-degré supplémentaire compte pour le climat. »

Un site incontournable avec ses multiples dossiers thématiques sur les climats et la météorologie : <http://www.meteofrance.com/accueil>

Cinquième rapport du GIEC, 2014 ipcc.ch/report/ar5/syr

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Les 6 grandeurs atmosphériques dont les moyennes caractérisent le climat sont : la nébulosité ou couverture nuageuse (a), les températures et précipitations (b), la pression atmosphérique (c), la direction et la force des vents (d) et l'hygrométrie (e).

2. Prenons Bordeaux comme exemple de ville dont on recherche les valeurs moyennes des principales grandeurs atmosphériques permettant de décrire le climat local.

Remarque : les élèves pourront choisir de communiquer le résultat de leurs recherches sous la forme d'un texte ou d'un tableau par exemple.

Une recherche effectuée sur le site www.meteofrance.com donne les moyennes des températures (minimales, maximales) et précipitations mensuelles sous forme de graphique.

Le site <https://fr.weatherspark.com> précise la nébulosité, la direction et la force du vent ainsi que l'humidité relative. Il donne également les paramètres précédents.

Le site <https://www.infoclimat.fr> permet d'accéder aux paramètres précédents mais également à la pression atmosphérique depuis 1931 pour les mêmes jours de l'année.

3. Comparaison météorologie et climatologie.

Critères de comparaison	Climatologie	Météorologie
Objectifs	Décrire le temps moyen qu'il faisait sur une zone géographique donnée.	Prévoir le temps qu'il fera pour une zone géographique donnée.
Méthodes	Calculer des moyennes des grandeurs atmosphériques relevées en continu sur la zone ou déduites d'indicateurs variés (pollens, traces de glaciers, etc.).	Relever les grandeurs atmosphériques du jour sur la zone puis les introduire dans des modèles numériques « prédictifs ».
Périodes étudiées	Les trente dernières années (normales saisonnières) ou cent ans ou plusieurs millénaires.	Les jours, voire les deux ou trois semaines à venir, avec un maximum de fiabilité.

Les indicateurs du climat global

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures in situ et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global. Il en existe d'autres : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers... »

Savoir-faire : « Identifier des tendances d'évolution de la température sur plusieurs échelles de temps à partir de graphiques. Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (niveau de la mer, extension d'un glacier). »

Le **document 1** explique comment un réseau de mesures bien réparti à la surface du globe permet actuellement d'estimer la température moyenne à l'échelle planétaire.

Remarque : soulignons qu'outre la quantité de points de mesure, la qualité des mesures s'est considérablement améliorée. À titre d'exemple, l'immersion directe d'un thermomètre dans l'eau de mer a été systématisée depuis les années 40 alors qu'auparavant, on tirait un seau d'eau sur le pont des bateaux afin de faire cette mesure. Cette méthode présentait deux biais : l'eau du seau s'évapore au contact de l'air et se refroidit d'une part, les matériaux composant le seau (bois, métal, etc.) isolent différemment l'eau de l'air ambiant d'autre part.

Le **document 2** illustre l'évolution de la température moyenne globale depuis 1880 à nos jours et permet de visualiser le réchauffement climatique actuel. Il s'agit ici d'une représentation classique de ce type de données, sous la forme d'un écart à la valeur moyenne d'une période, qui peut être très variable. Il faut donc prendre le temps de comprendre ce type de représentation avec nos élèves car elle peut ne pas être intuitive. Il s'agit d'un mode de communication récurrent en climatologie que l'on retrouvera donc dans de nombreux autres documents, dans ce chapitre et les suivants, mais aussi, très probablement au sein des sujets des E3C. Une attention particulière devra donc être portée au texte qui explicite comment lire ce type de graphique.

Remarque : la courbe rouge sobrement indiquée comme étant une tendance correspond de façon plus précise à la moyenne glissante sur 5 ans des moyennes annuelles.

On pourra aussi consulter le site : <https://www.climatelevels.org/> qui permet d'analyser de façon dynamique l'évolution temporelle de différents paramètres climatiques et atmosphériques dont la température et le niveau marin (doc. 3).

Le **document 3** présente les trois indicateurs du climat global cités dans le programme. D'abord la surface des banquises (docs. 3a et 3b), puis l'étendue et l'épaisseur des glaciers (doc. 3c) et enfin, le niveau moyen des océans qui témoigne du volume des eaux océaniques (doc. 3d).

Afin de suivre « en direct » l'évolution des glaciers, vous pouvez consulter le site du service d'observation *Glacioclim* <https://glacioclim.osug.fr> ou <http://www.ige-grenoble.fr-glaciologie->

Pour suivre celle des banquises : <https://www.climate.gov/>

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Les mesures permettant de calculer la température moyenne du globe de 1873 à nos jours se sont affinées car les points de mesure ont été multipliés dans de nombreux lieux (continents, océans), les appareils de mesures uniformisés et des technologies comme l'observation satellitaire de la Terre utilisées.

2. La lecture du graphique montre que la température moyenne globale fut globalement stable de 1880 à 1900 avant de connaître une baisse légèrement inférieure à 0,2 °C de 1900 à 1910. Puis, de 1910 à 1940, on assiste à un réchauffement de 0,4 °C avant une période de légère baisse (0,1 °C), puis de stabilisation jusqu'en 1970. De 1970 à nos jours, l'écart de température par rapport à la moyenne de la période 1880-1920 augmente très rapidement de +0,2 à +1,1 °C, soit un gain de 0,9 °C sur cette période.

Globalement, la température moyenne du globe est en hausse d'un peu plus de 1,2 °C de 1910 à 2019.

3. Trois autres indicateurs climatiques sont utilisés : la surface des banquises, celle des glaciers continentaux et le niveau moyen des océans. La surface de la banquise arctique a diminué de 50 % alors que celle de la banquise antarctique est stable entre 1980 et 2015. La superficie et l'épaisseur de la mer de glace ont baissé conjointement : de 1912 à 2015, le glacier a ainsi perdu 160 mètres d'épaisseur ! Le niveau moyen des océans s'est élevé de 8 cm au cours des 25 dernières années. L'augmentation des valeurs de ces indicateurs climatiques confirme bien un

réchauffement climatique global, même si ce dernier n'est pas attesté ici en Antarctique.

p. 43 ■ **ACTIVITÉ 3**

La variabilité naturelle du climat terrestre

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. »

Savoir-faire : « Interpréter des documents donnant la variation d'un indicateur climatique en fonction du temps (date de vendanges). Identifier des traces géologiques de variations climatiques passées (pollens, glaciers). »

Les variations naturelles du climat sont successivement abordées à des échelles de temps de plus en plus grandes : les siècles dans le **document 1**, les millénaires dans le **document 2** et le million d'années dans le **document 3**. Un indicateur climatique différent correspond à chaque échelle temporelle d'étude.

Le **document 1** présente l'évolution de la date de floraison des cerisiers à Kyoto (Japon). Ces dates sont particulièrement bien relatées dans des écrits historiques du fait de la coutume de pique-niquer sous les cerisiers en fleur, appelée *hanami* en japonais.

« À partir de l'ère Heian (794-1191), les nobles, qui jusque-là, comme l'attestent de nombreux poèmes de l'époque, semblaient préférer les fleurs de pruniers, se mirent à admirer les cerisiers en fleurs. Le premier *hanami* aurait été organisé par l'empereur Saga en 812, dans le jardin Shinsen-en de Kyoto » (source <https://www.vivrelejapon.com/a-savoir/comprendre-le-japon/hanami-histoire-cerisiers-fleurs>).

Le **document 2** concerne l'étude de l'évolution du climat depuis 20 000 ans à partir des grains de pollen trouvés dans les sédiments des lacs, notamment ceux du Jura et de Suisse. La comparaison de l'évolution de l'abondance relative de chaque type de pollen (doc. 2a) avec les préférences climatiques des espèces correspondantes (doc. 2b) permet de reconstituer l'histoire climatique de la région étudiée.

Remarque : le logiciel Paléobiome 2 permet de traiter concrètement d'autres exemples que celui présenté ici : <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/paleobiomes/enseigner/logiciel-paleobiomes2>

Le **document 3** montre des études glaciologiques réalisées en Antarctique au dôme C tant sur la glace elle-même, que sur les bulles d'air contenues (docs. 3a à c). Il ne s'agit pas ici d'expliquer le principe du paléothermomètre isotopique reposant sur l'étude de δ¹⁸O qui relève du programme de Terminale spécialité SVT. On se contentera donc de réaliser une corrélation entre l'évolution de la température déduite de ce paléothermomètre, (doc. 3d) avec l'évolution de la teneur en CO₂ mesurée au sein des bulles d'air de la glace (doc. 3e).

À lire : *Mémoires sauvées des glaces*, Claude Lorius, éditions Flammarion, 2016. L'auteur est un glaciologue français qui, avec Jean Jouzel, mit en évidence le lien entre la concentration en GES de l'atmosphère et l'évolution du climat.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Au cours des derniers siècles, la date de floraison des cerisiers a oscillé entre le 21 avril en 1540 et le 6 avril en 2 000. Elle avait lieu à Kyoto entre le 10 et le 20 avril lors du dernier millénaire mais elle se déroule entre le 05 et le 10 avril depuis plus de 30 ans. La précocité accrue de cette floraison accrédite l'existence d'un réchauffement climatique actuel qui impacte le vivant.

2. Entre - 20 000 ans et environ - 13 000 ans, les pollens des joncs et des bouleaux sont présents, ce qui indiquent un climat froid et humide (joncs majoritaires). Puis, de - 13 000 à - 11 500 ans, l'abondance des pollens des joncs s'effondre alors que celle des bouleaux augmente fortement. Cela traduirait un climat toujours froid mais plus sec. De - 11 500 à - 8 500 ans, on constate une régression de l'abondance des pollens de ces deux espèces. Les pollens de sapin (+ de 20 %) et d'aune (+ de 30 %) deviennent ensuite dominants entre - 8 500 ans et - 500 ans. Les données palynologiques traduisent donc un réchauffement climatique à partir de - 11 500 ans conduisant à un climat tempéré humide.

3. Peu après - 800 000 ans, on constate une augmentation « rapide » des températures de + 8 °C. Puis, ces dernières baissent de manière irrégulière et progressive jusqu'à - 700 000 ans et retrouvent leur niveau initial. Ce phénomène est identifiable 8 fois entre - 800 000 ans et actuellement avec une périodicité d'environ 100 000 ans. Il s'agit

donc bien d'un cycle qui se répète sur la période étudiée. Ce cycle n'est cependant pas « parfait » dans sa durée et ses variations de température.

4. Un « pic » d'augmentation des températures coïncide toujours avec un « pic » d'augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique, de même pour une baisse. Il y a bien une corrélation entre ces deux paramètres. Sachant que le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre, on peut formuler l'hypothèse que l'accroissement du taux atmosphérique de ce gaz provoque un réchauffement global.

On peut aussi émettre l'hypothèse que le réchauffement provoque une libération de CO_2 dans l'atmosphère à partir des océans.

p. 46 ■ **ACTIVITÉ 4**

Un bilan radiatif déséquilibré

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Depuis un siècle et demi, on mesure un réchauffement climatique global (environ $+1\text{ }^\circ\text{C}$). 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 : CO_2 , CH_4 , N_2O et vapeur d'eau principalement. 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. Cette puissance additionnelle entraîne une perturbation de l'équilibre radiatif qui existait à l'ère préindustrielle. L'énergie supplémentaire associée est essentiellement stockée par les océans, mais également par l'air et les sols, ce qui se traduit par une augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et la montée du niveau des océans. »

Savoir-faire : « Déterminer la capacité d'un gaz à influencer l'effet de serre atmosphérique à partir de son spectre d'absorption des ondes électromagnétiques. »

Cette activité pose les bases de la compréhension du réchauffement actuel et de ses causes anthropiques, ce qui constitue un enjeu majeur pour nos sociétés.

Le **document 1** rappelle les acquis du programme de la classe de 1^{re} enseignement scientifique sur

l'équilibre du bilan radiatif, notion fondamentale dont la compréhension est essentielle pour la suite du thème. Ainsi, la Terre reçoit une puissance solaire de $342\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ dont environ 30 % sont directement réfléchis dans l'espace (soit $102\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) du fait de l'albédo alors que la part restante est absorbée par la surface et l'atmosphère. Cette énergie est renvoyée vers le sol et vers l'espace sous la forme d'un rayonnement infrarouge (IR) en partie absorbé, temporairement, par les GES d'où le réchauffement de l'atmosphère. À terme, l'intégralité de l'énergie sera réémise vers l'espace (soit $240\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) d'où un bilan radiatif équilibré et nul ($342 - 102 - 240 = 0$) et une température stable.

Une animation *Edumedia* vient compléter le document pour aider à la compréhension de ces phénomènes.

Le **document 2** traite du déséquilibre possible de ce bilan radiatif de façon théorique et permet, dans la continuité du document précédent (la partie rouge des flèches représentant le rayonnement IR terrestre et la partie jaune le rayonnement solaire incident ou réfléchi), de vérifier la bonne compréhension des phénomènes mis en jeu. Ainsi, on explique que le bilan radiatif terrestre peut varier (forçages radiatifs) et se retrouver en situation de déséquilibre conduisant soit à une augmentation de la température (par exemple *via* une diminution de l'albédo) soit à une diminution (*via* une augmentation de l'albédo).

Le **document 3** présente les principaux gaz responsables de l'effet de serre et permet de travailler le savoir-faire du programme (*via* le graphique). Ce document introduit également la notion de PRG (pouvoir de réchauffement global) qui permet ensuite de comparer l'efficacité de chaque gaz, mais aussi de procéder aux conversions en équivalent CO_2 (éq CO_2) qui seront nécessaires dans le chapitre suivant. La mise en relation des spectres d'absorption de chaque gaz avec son temps de résidence explique chaque PRG.

Enfin, le **document 4** compare l'évolution de la teneur atmosphérique de chacun de ces gaz depuis 1650 avec l'activité économique mondiale présentée sous la forme du PMB (produit mondial brut égal à la somme des PIB de chaque nation). Une corrélation temporelle pourra donc être établie entre ces différents paramètres.

Remarque : cette corrélation sera rappelée au cours du chapitre 3 où il s'agit de démontrer qu'elle s'explique par une relation de causalité.

Erratum : l'indication de la teneur en CO₂ (en noir) pour l'année 2018 est 408. Sera corrigé dans le manuel élève et numérique.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. D'après le schéma du doc. 2a, le bilan radiatif peut être par exemple modifié par une augmentation de l'albédo, d'où une quantité d'énergie sortante supérieure à ce qui est reçu donc un bilan radiatif négatif et une baisse de la température. On pourrait aboutir à cette baisse de température en diminuant le flux entrant de l'énergie lumineuse reçue ou en diminuant l'effet de serre (augmentation du flux IR sortant).

Une augmentation de température provient d'un bilan radiatif positif dû à, par exemple, une diminution de l'albédo comme le montre le schéma ou à une augmentation du flux entrant ou encore à une augmentation de l'effet de serre (diminution du flux IR sortant).

2. On ne doit pas tenir compte des pics d'absorption pour des longueurs d'ondes inférieures à 5 µm car ces ondes ne sont que très peu émises par la Terre.

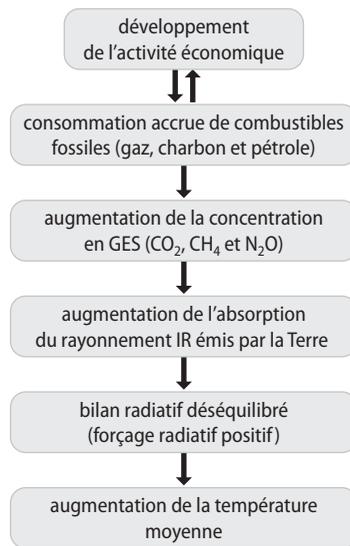
On observe que le spectre d'absorption du protoxyde d'azote présente deux pics majeurs dans le domaine des IR vers 8 µm (60 à 70 % d'absorption) et entre 16 et 17 µm (20 % d'absorption avec un pic à 70 % pour 16,5 µm) alors que le CO₂ ne présente qu'un seul pic entre 14 et 16 µm (environ 40 % d'absorption avec un pic à 90 % pour 15 µm). Or, on nous indique que les courtes longueurs d'ondes sont plus énergétiques que les grandes longueurs d'onde. Le protoxyde d'azote peut donc absorber plus d'énergie que le dioxyde de carbone du fait de son pic d'absorption vers 8 µm.

De plus, son temps de résidence est beaucoup plus long (120 ans contre 10 ans pour le CO₂).

Sur 100 ans, une certaine quantité de protoxyde d'azote pourra donc absorber plus d'énergie que la même quantité de CO₂.

3. Le CO₂ reste cependant un gaz à effet de serre plus important car il est beaucoup plus présent dans l'atmosphère que N₂O. En effet, on remarque dans le document 4 que sa concentration actuelle est de l'ordre de 400 ppm alors que celle de N₂O est de l'ordre de 330 ppb soit 0,33 ppm.

4. On peut proposer le schéma suivant pour expliquer l'origine du déséquilibre actuel :



On observe en effet que l'augmentation de la teneur de ces différents GES débute à partir de 1900, parallèlement à l'augmentation du PMB qui traduit une activité économique de plus en plus importante, activité qui repose essentiellement sur la consommation de ressources fossiles.

p. 48 ■ **ACTIVITÉ 5**

L'amplification du réchauffement climatique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « L'évolution de la température terrestre moyenne résulte de plusieurs effets amplificateurs (rétroaction positive), dont : l'augmentation de la concentration en vapeur d'eau (gaz à effet de serre) dans l'atmosphère ; la décroissance de la surface couverte par les glaces et diminution de l'albédo terrestre ; le dégel partiel du permafrost provoquant une libération de GES dans l'atmosphère. À court terme, un accroissement de la végétalisation constitue un puits de CO₂ et a donc un effet de rétroaction négative (stabilisatrice). ».

Savoir-faire : « Identifier les relations de causalité (actions et rétroactions) qui sous-tendent la dynamique d'un système. ».

Comme pour l'activité précédente, la compréhension des phénomènes amplificateurs du réchauffement actuel constitue un enjeu majeur pour nos sociétés comme nous en avertit le GIEC. Ces

mécanismes seront remobilisés au cours du chapitre suivant.

Erratum : dans l'intro de l'activité « une augmentation de 3 à 5 °C ». Sera corrigé dans le manuel élève et numérique.

Le **document 1** présente l'effet amplificateur positif lié à la vapeur d'eau pour expliquer la notion de boucle de rétroaction positive en s'appuyant sur un schéma fonctionnel relativement classique mais néanmoins complexe. Il s'agit là de l'un des phénomènes amplificateurs les plus difficiles à évaluer pour les chercheurs (d'où l'emploi du conditionnel). Aussi, il est possible que l'effet corresponde davantage à une rétroaction négative. Cela en fait donc un exemple intéressant, illustrant à la fois l'existence des deux types de rétroaction ainsi que la complexité du système climatique, titre du chapitre.

La suite de l'activité repose sur la bonne compréhension de ce document puisqu'il s'agira, pour l'élève, de transposer ce type de représentation aux autres exemples.

Le **document 2** s'intéresse à la fonte du pergélisol qui constitue une véritable « bombe à retardement climatique » de plus en plus étudiée au cours des dernières années.

Le **document 3** présente le cas de la fonte de la banquise arctique déjà évoquée dans l'activité 2 p. 43 associé à l'influence de l'albédo.

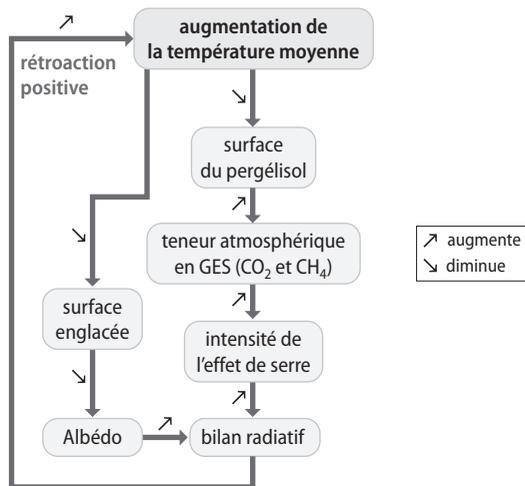
Le **document 4** traite du cas particulier de la végétalisation qui profiterait de l'effet fertilisant du CO₂ atmosphérique (doc. 4a). Ce point est à discuter particulièrement du fait de la difficulté à distinguer par satellite (doc. 4b) l'augmentation de la productivité des écosystèmes de celle des agrosystèmes et, par ailleurs, du fait de la concurrence de la déforestation.

►Exemple de correction des pistes de travail

1. Les facteurs à l'origine d'une rétroaction positive sont l'augmentation de la teneur atmosphérique en vapeur d'eau et l'augmentation de la quantité de nuages, ces deux facteurs provoquant une accentuation de l'effet de serre.

Le facteur provoquant une rétroaction négative est l'augmentation de l'albédo due aux nuages.

2. On propose le schéma suivant :



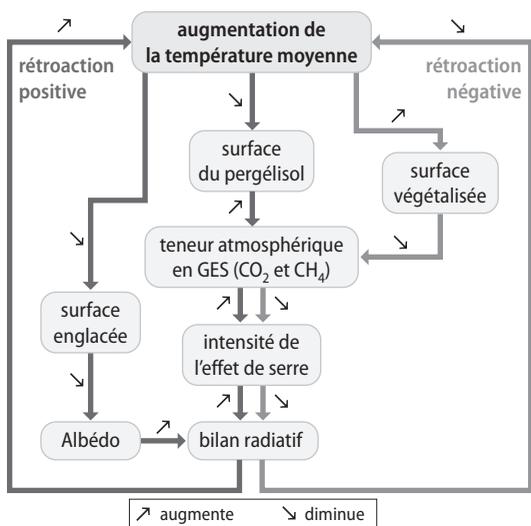
3. On observe dans le doc. 4a que la consommation de dioxyde de carbone lors de la photosynthèse augmente si sa concentration augmente, ce qui permet d'expliquer l'accroissement des surfaces végétalisées. Cependant, on observe également que la photosynthèse atteint une consommation maximale de CO₂ qui dépend de l'intensité du rayonnement reçu. Par exemple, pour un rayonnement supérieur à 286 W · m⁻² (correspondant aux régions intertropicales), la photosynthèse atteint son maximum d'efficacité pour une teneur en CO₂ supérieure à 820 ppm (potentiellement atteinte d'ici la fin du siècle).

Cela signifie que l'effet bénéfique sur la végétalisation de l'augmentation du taux de CO₂ va s'amoinrir avec le temps sur le plus ou moins long terme.

Et surtout, l'accroissement de la végétalisation se fait à une vitesse de 54,5 millions d'ha par an (18 × 10⁸ / (2015-1982)) alors que la déforestation avance à raison de 30 millions d'ha par an. Cette déforestation a en partie pour objectif de créer des zones cultivées dont la capacité de stockage du carbone est très inférieure à celle des forêts. On peut donc penser qu'une grande partie de l'augmentation de la végétalisation se traduit en réalité par une perte de la capacité de stockage du carbone.

À long terme, cet avantage risque donc de disparaître.

Le schéma devient :



4. On a vu que le réchauffement climatique était capable de s'auto-amplifier du fait de différents mécanismes de rétroaction positive (vapeur d'eau et nuages, libération de quantités massives de GES du pergélisol, albédo diminué par la fonte des glaces) plus nombreux et sans doute plus efficaces que les mécanismes de rétroaction négative (albédo augmenté du fait de la formation des nuages, végétalisation). Cela conduit à l'idée que, même en cas d'arrêt des émissions de GES dues aux activités humaines, l'augmentation de la température du globe se poursuivra.

p. 50 ■ **ACTIVITÉ 6**

Océans et réchauffement climatique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « L'océan a un rôle amortisseur en absorbant à sa surface une fraction importante de l'apport additionnel d'énergie. Cela conduit à une élévation du niveau de la mer causée par la dilatation thermique de l'eau. À celle-ci s'ajoute la fusion des glaces continentales. Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles. »

Savoir-faire : « Réaliser et interpréter une expérience simple, mettant en évidence la différence d'impact entre la fusion des glaces continentales et des glaces de mer. Estimer la variation du volume de l'océan associée à une variation de température donnée, en supposant cette variation limitée à une couche superficielle d'épaisseur donnée. »

Comme pour les deux activités précédentes, la compréhension des relations océans-atmosphère est un enjeu majeur pour nos sociétés notamment pour ce qui est des risques associés à l'élévation du niveau marin.

Le **document 1** explique pourquoi les océans jouent le rôle de facteur de modération du réchauffement climatique en accumulant l'essentiel de l'énergie reçue (doc. 1b) sans pour autant que cela conduise à une élévation de la température des eaux puis de l'air au moins sur le court terme. Sur le long terme, les océans finiront par libérer l'énergie accumulée dans l'air, conduisant à un réchauffement atmosphérique important.

Remarque : il serait intéressant ici de déterminer, avec les élèves, s'il s'agit d'une boucle de rétroaction positive ou non. Si on considère qu'une boucle de rétroaction positive consiste à une auto-amplification du réchauffement de l'atmosphère, on peut dire que non puisque l'atmosphère ne participe que très peu au réchauffement des océans, l'essentiel venant de l'absorption du rayonnement du fait du faible albédo des masses océaniques.

Le doc. 1a permet à la fois d'explicitier ce que l'on entend par couches d'eau superficielles ou profondes et pose les bases de la modélisation mathématique du système océanique nécessaires au document 3.

Le **document 2** présente l'une des conséquences les plus graves, pour de nombreuses populations, du réchauffement climatique : l'élévation du niveau de la mer que le site *flood.firetree* permet d'explorer à différentes échelles géographiques et pour différentes amplitudes.

De nombreuses indications chiffrées sont fournies de façon à pouvoir comparer les résultats fournis par l'exploitation du document 3 avec la réalité.

Le **document 3** propose de mener deux activités pratiques permettant d'explicitier les deux causes principales de l'élévation du niveau marin conformément au programme : la fonte des glaces continentales (doc. 3a) et la dilatation thermique des océans (doc. 3b). Facile à mener et simple à comprendre, l'expérience du doc. 3a peut être lancée en début de séance et menée parallèlement à celle du doc. 3b, plus complexe. Une vidéo propose un exemple de résultat.

La seconde expérience propose un protocole détaillé et nécessite une certaine rigueur scientifique. S'il est relativement difficile d'obtenir un résultat fiable pour les élèves, il est toujours intéressant d'illustrer concrètement et visuellement

l'effet de la dilatation thermique. Un exemple de résultat est fourni pour permettre l'exploitation.

Remarque : le coefficient de dilatation thermique varie avec la température. On peut se référer au document c de l'exercice 12 de la page 59.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. On voit sur le document 2a qu'en 2010, les océans ont accumulé environ $260 \cdot 10^{21}$ J soit $\frac{260}{275} \times 100 = 94,5$ % de l'énergie du système climatique. Cette énergie ne se retrouve donc pas dans l'atmosphère, ce qui évite son réchauffement à court terme. À long terme, cette énergie provoquera l'augmentation de la température des océans qui réchaufferont alors l'atmosphère d'où une aggravation du réchauffement climatique.

2. On observe suite à la première expérience (doc. 3) que seule la fonte de la glace déposée sur un support provoque une élévation du niveau d'eau dans le bécher. Cela nous indique que l'on ne doit tenir compte que de la fonte des glaces continentales pour expliquer l'élévation du niveau marin soit 13×10^{12} tonnes de glaces (doc. 2).

On nous indique que la fonte d' 1 kg de glace donne $1,09 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ d'eau liquide.

On a donc un volume d'eau liquide supplémentaire de :

$$V = 1,09 \cdot 10^{-3} \times 13 \times 10^{12} \times 10^3 = 14,17 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$$

Connaissant la surface des océans (doc. 1) à convertir en m^2 , on peut calculer, en supposant la surface constante, la hauteur d'eau que cela représente donc l'élévation provoquée (notée E_g pour élévation liée à la glace) :

$$V = S \times E_g$$

$$E_g = \frac{V}{S}$$

$$E_g = \frac{14,17 \cdot 10^{12}}{3,8 \cdot 10^{14}}$$

$$E_g = 3,73 \cdot 10^{(12-14)} = 3,73 \cdot 10^{-2} = 0,0373 \text{ m}$$

La fonte des glaces continentales a donc provoqué une élévation globale du niveau des océans depuis 1940 d'environ 3,8 cm.

3. D'après les résultats de la seconde expérience, on peut calculer le coefficient de dilatation thermique de l'eau de mer :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V_i \times \Delta T}$$

$$\alpha = \frac{0,5}{510 \times 3,7}$$

$$\alpha = 2,65 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

D'après le document 1, on peut considérer que seuls les 700 premiers mètres ont subi une élévation de température de $0,4$ °C. Ces 700 premiers mètres correspondent à un volume de :

$$V_i = S \times h$$

$$V_i = 3,8 \cdot 10^8 \times 0,7$$

$$V_i = 2,66 \cdot 10^8 \text{ km}^3$$

L'augmentation de volume dû à la dilatation thermique est :

$$\Delta V = \alpha \times (V_i \times \Delta T)$$

$$\Delta V = 2,65 \cdot 10^{-4} \times 2,66 \cdot 10^8 \times 0,4$$

$$\Delta V = 2,82 \cdot 10^{(-4+8)} = 2,82 \cdot 10^4 \text{ km}^3$$

Ce qui correspond à une élévation notée E_d (pour élévation liée à la dilatation) de :

$$V = S \times E_d$$

$$E_d = \frac{V}{S}$$

$$E_d = \frac{2,82 \cdot 10^4}{3,8 \cdot 10^8}$$

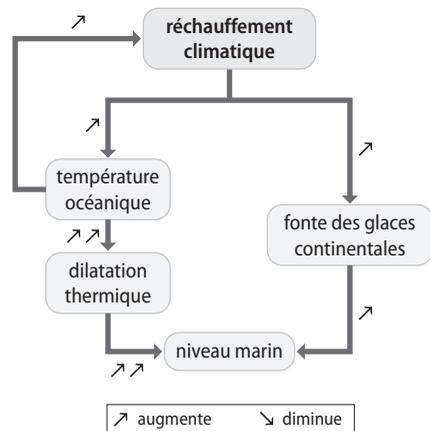
$$E_d = 0,742 \cdot 10^{(4-8)} = 0,742 \cdot 10^{-4} = 0,0000742 \text{ km} = 7,42 \text{ cm.}$$

La dilatation thermique des océans a donc provoqué une élévation globale du niveau des océans depuis 1940 d'environ 7,42 cm.

4. On peut donc dire que la dilatation thermique a provoqué une augmentation du niveau des océans presque deux fois supérieure à celle de la fonte des glaces ($\frac{7,42}{3,8} = 1,95$).

Les valeurs obtenues ($7,42 + 3,8 = 11,22$ cm) sont inférieures à l'élévation réelle qui est de 15 cm soit du fait des incertitudes soit de l'existence d'autres facteurs participant à l'élévation des mers.

5. On propose le schéma suivant :



Remarque : l'aggravation du réchauffement climatique n'est pas à considérer comme une boucle de rétroaction positive car l'augmentation de la température des océans est davantage causée par l'absorption du rayonnement lumineux et IR qu'à l'augmentation de la température de l'air proprement dite.

CORRECTION DES EXERCICES

p. 55 ■

Vérifier ses connaissances

1 Question à réponse unique

A- 3

La qualité de l'air dépend de paramètres comme la présence de pollens ou de polluants divers (particules fines, ozone) qui ne sont pas à proprement parler des variables météorologiques (revoir le doc. 1 p. 40).

B- 4

Pour les autres échelles de temps, on parlera davantage de variations de la météorologie.

C- 2

Les GES absorbent le rayonnement IR émis par le sol d'où une augmentation de la température de l'air. L'air émet alors à son tour un rayonnement IR en partie dirigé vers le sol qui s'ajoute aux rayons du Soleil d'où l'augmentation de la puissance radiative reçue.

D- 2

Seule la fonte des glaciers continentaux (réponses 1, 3 et 4) participe à l'élévation du niveau marin comme le prouve l'expérience du doc. 3a p. 51.

2 Résumer les notions essentielles du cours

a. La température terrestre moyenne, l'étendue des surfaces glacées et le volume des océans constituent les indicateurs climatiques majeurs.

Une tendance au réchauffement du climat sera ainsi décelée par une augmentation de la température moyenne, une diminution des surfaces glacées et une augmentation du volume des océans. Inversement en cas de refroidissement.

b. La météorologie étudie les variations des principales grandeurs atmosphériques sur le court terme (jours, voire semaines) et dans un but prévisionnel alors que la climatologie étudie les variations de leurs moyennes sur un terme plus long (années, siècles, millénaires).

c. L'augmentation actuelle de la concentration atmosphérique en CO₂ est exceptionnelle par les valeurs qu'elle atteint (inédite depuis au moins 800 000 ans) et par la vitesse à laquelle cette augmentation a lieu.

d. L'augmentation de la température moyenne de l'air conduit à une élévation de la température des océans et donc favorise l'évaporation de l'eau. Cette dernière étant un GES très efficace, cela conduit à une nouvelle augmentation de température de l'air.

Le réchauffement climatique entraîne une fonte des glaces (dont la capacité à réfléchir la lumière reçue donc l'albédo est fort) et une élévation du niveau marin donc des surfaces océaniques (dont l'albédo est faible). L'albédo moyen de la Terre est donc amené à diminuer ce qui signifie une augmentation de la puissance solaire absorbée, d'où une élévation de la température.

Enfin, le dégel partiel du pergélisol conduit à une libération accrue de GES (CO₂ et CH₄) qui y étaient piégés, d'où une accentuation de l'effet de serre et du réchauffement climatique.

Ces 3 phénomènes, initiés par le réchauffement climatique, amènent à l'amplifier. Il s'agit donc bien de boucles de rétroactions positives.

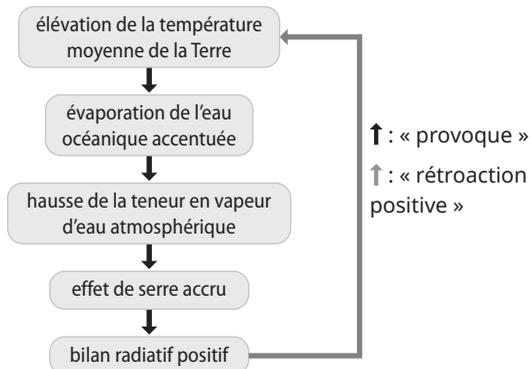
3 Avoir un regard critique

a. L'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires sur un rythme de 100 000 ans prouve que le climat de la Terre varie sur de grandes échelles de temps.

b. La montée actuelle du niveau des océans résulte à la fois de la fonte des glaces continentales et de la dilatation thermique des eaux océaniques. Ce dernier paramètre semble être le paramètre majeur de cette augmentation (revoir l'activité 6).

c. L'accroissement du couvert végétal constitue un puits et non pas une source de CO₂ car ce dernier est absorbé par les végétaux par photosynthèse. En diminuant la quantité de CO₂ atmosphérique, ce couvert végétal exerce une rétroaction négative sur le réchauffement climatique. La reforestation constitue ainsi un moyen efficace de lutter contre le réchauffement climatique.

4 Compléter un schéma bilan



5 Retour sur les problématiques

• Comment connaître les variations climatiques passées ?

Les relevés météorologiques locaux, les écrits historiques, l'analyse des cernes des arbres ou des pollens déposés dans les lacs, les traces de glaciers anciens laissés sur les roches, la composition des glaces... permettent de reconstituer les climats du passé.

• Quels sont les facteurs, naturels ou humains, qui peuvent influencer le climat ?

Des facteurs naturels comme les variations de la teneur en eau de l'atmosphère et de l'albédo, le gel ou le dégel partiel du pergélisol, l'activité solaire... peuvent influencer le climat terrestre. Un facteur humain, comme le rejet de CO_2 dans l'atmosphère dû à la déforestation ou à la combustion de charbon et de pétrole, modifie actuellement le climat en le réchauffant.

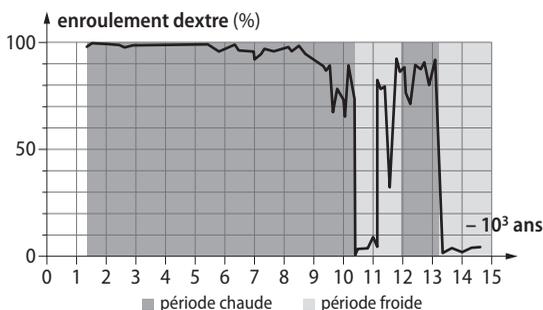
p. 57

Exercice similaire

7 Reconstituer le climat par l'étude des foraminifères fossiles

Trois oscillations climatiques majeures sont identifiables sur ce graphique, réchauffement ou refroidissement.

Vers - 13 000 ans le pourcentage de foraminifères à enroulement dextre augmente de moins de 5 % à 95 %, ce qui traduit un réchauffement. Ensuite, une période « chaude » se maintient pendant 1 000 ans. Puis entre - 12 000 et - 10 500 ans, ce pourcentage devient nul, ce qui montre un refroidissement. En environ 500 ans, de - 10 500 ans à - 10 000 ans, un nouveau réchauffement a alors lieu. Une période « chaude », où 100 % des foraminifères ont un enroulement dextre, se maintient par la suite de - 10 000 ans jusqu'à nos jours.



S'entraîner

8 L'évolution de l'étendue de la banquise arctique

1. Les banquises se forment par le gel de l'eau de mer en surface des océans, lorsque la température de l'eau atteint $-1,8\text{ °C}$

2. De 1979 à 2016, la surface de la banquise arctique est passée d'un peu plus de 7 à un peu moins de 5 millions de km^2 soit une diminution d'environ 2,5 millions de km^2 sur cette période.

3. Cette diminution ayant été constatée ici sur 37 années consécutives, il s'agit donc d'un indicateur climatique.

4. La banquise arctique, par définition, ne repose pas sur un continent et sa fonte n'entraîne pas une hausse du niveau marin (voir expérience analogique page 51).

9 Spectres d'absorption de l'infrarouge et effet de serre

1. Si on observe la partie du graphique allant de 7 à 16 μm de longueur d'onde, ce qui correspond au rayonnement IR de la Terre, on voit que le gaz absorbant le plus cette gamme de radiation est la vapeur d'eau (H_2O), suivi du dioxyde de carbone (CO_2), puis du méthane (CH_4), du protoxyde d'azote (N_2O) et enfin du dioxygène (O_2) et de l'ozone (O_3).

2. Pour évaluer le pouvoir de réchauffement d'un gaz à effet de serre, il faut aussi estimer sa concentration dans l'air et son temps de résidence.

10 La Mer de Glace au cours des 20 prochaines années

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

11 Une comparaison de la température moyenne en France et sur la planète

Globalement, l'évolution de la température moyenne de la planète est comparable à celle de la France métropolitaine, de 1880 à 2013. Trois périodes sont bien identifiables. De 1880 à 1940, ces températures présentaient des écarts similaires par rapport à la période de référence choisie, de $-0,2$ à $-0,4\text{ °C}$. De 1940 à 1980, des

écarts positifs puis négatifs ont alterné plus ou moins régulièrement. De 1980 à 2015, les écarts positifs n'ont pas cessé d'être observés et ce, avec une valeur croissant régulièrement. Ainsi, lors des 33 dernières années, cet écart est passé de 0 à +0,8 °C pour la planète et de 0 à +0,6 °C pour la France métropolitaine, traduisant ainsi un réchauffement climatique. La seule différence réside dans le fait que les écarts de température constatés sur la planète sont toujours un peu plus grands que ceux de la France métropolitaine.

12 **Prépa BAC** **Élévation du niveau marin et dilatation thermique**

1. L'autre origine possible de l'augmentation du niveau de la mer est la fonte des glaces continentales.

2. De 1900 à 2017, le niveau de la mer s'est élevé d'environ 21,5 cm ce qui correspond à une élévation moyenne annuelle de $\frac{21,5}{2017-1900} = \frac{21,5}{117} = 0,18 \text{ cm} \cdot \text{an}^{-1}$.

3. Le volume initial des eaux superficielles V_i est de : $0,7 \times 3,8 \times 10^8 = 2,66 \times 10^8 \text{ km}^3$.

4. D'après le doc. c, pour une valeur de la température moyenne des eaux superficielles de 10 °C, le coefficient α vaut 0,00026.

5. La valeur de ΔV est donc de :

$$\Delta V = \alpha \times V_i \times \Delta T$$

$$\Delta V = 0,00026 \times 2,66 \times 10^8 \times 0,8$$

$$\Delta V = 55\,328 \text{ km}^3$$

6. L'élévation du niveau marin de 1900 à 2017 provoquée par la dilatation thermique est donc de :

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{3,8} \times 10^8$$

$$\Delta h = \frac{55\,328}{3,8} \times 10^8$$

$$\Delta h = 1,456 \times 10^{-4} \text{ km}$$

$$\Delta h = 14,56 \text{ cm}$$

7. Cette élévation représente $\frac{14,56}{21,5} \times 100 = 67,7 \%$

de l'élévation totale du niveau de la mer sur cette période ce qui en fait la cause principale.

Le climat du futur

LE PROGRAMME

1. Science, climat et société

1.3 – Le climat du futur

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 : la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ; des méthodes numériques de résolution.</p> <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 : 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>	<p>Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet.</p>
Prérequis et limites	
<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>	

► SITUATION 1

La notion de modèles scientifiques est une notion centrale du chapitre. Aussi, il est essentiel que les élèves puissent aborder cette partie en ayant à l'esprit les avantages de la modélisation scientifique analogique ou numérique (possibilité de réaliser des expériences à l'infini, prédictibilité des résultats, perfectionnement possible du modèle) et ses faiblesses (simplification de la réalité, dépendance vis-à-vis des possibilités techniques d'une époque). On s'appuie ici sur deux exemples de modèles travaillés en classe de 1^{re} enseignement scientifique.

► Exemple de réponse attendue

Un modèle scientifique est une représentation simplifiée de la réalité. Ainsi, il est possible de mener des expériences sur des sujets d'étude impossible à manipuler dans la réalité pour des raisons d'échelle de taille ou de temps. Étant simplifié, il peut permettre de comprendre les mécanismes principaux d'un système avant de commencer à étudier des phénomènes plus complexes. Le modèle lui-même peut être amélioré en fonction des découvertes, de l'évolution des technologies et des résultats qu'il fournit. Enfin, un modèle peut permettre de réaliser des prévisions.

Complément

Ces dernières années, les scientifiques réalisent de réels progrès dans de nombreux domaines (médecine, climatologie, agronomie etc.) en utilisant des modèles numériques de plus en plus sophistiqués et en s'appuyant sur une puissance de calcul croissante fournies par des supercalculateurs.

► En classe de 1^{re} enseignement scientifique

La notion de modélisation du climat est développée dès l'activité 1. Elle est ensuite naturellement réexploitée dans l'ensemble des activités notamment dans l'activité 3 qui introduit les notions de prévision et de projection climatiques.

Remarque : ces notions pourront être réinvesties dans le cadre du programme de T^{ale} spécialité SVT.

► SITUATION 2

Dès le cycle 4, puis au lycée, les élèves sont sensibilisés aux questions environnementales en SVT mais aussi en Histoire Géographie, en Enseignement scientifique de 1^{re} et dans d'autres disciplines. On souhaite ici remobiliser ces acquis vis-à-vis des sources d'émissions de dioxyde de carbone et faire le point sur ce qui est connu ou

non des élèves en s'appuyant sur leur vécu quotidien, ce qui peut amener à des comparaisons intéressantes selon les modes de vie de chacun.

► Exemple de réponse attendue

On peut citer comme combustibles à l'origine d'un dégagement de CO₂ et utilisés quotidiennement :

- le bois de chauffage ou le charbon pour un usage domestique (chauffage, cuisine).
- le gaz naturel (ou « gaz de ville ») pour le chauffage ou la cuisine.
- les carburants (essence, diesel, fuel) pour alimenter les véhicules et le fuel domestique pour le chauffage.

Complément

On peut considérer que l'utilisation de bois de chauffage ne participe pas au réchauffement climatique car le CO₂ rejeté peut être vu comme le CO₂ de notre époque, piégé il y a quelques années par photosynthèse par l'arbre ayant produit ce bois. Par contre, l'utilisation de combustibles fossiles ajoute dans l'atmosphère du CO₂ d'une autre époque, piégé au sein des roches depuis des centaines de millions d'années, et qui peut donc être vu comme le véritable responsable du changement de climat.

► En classe de 1^{re} enseignement scientifique

L'activité 2 permettra de dresser le bilan de nos émissions en gaz à effet de serre (GES) depuis 1970 en fonction de différents secteurs d'activité. Une corrélation sera établie entre ces émissions et l'augmentation de leurs concentrations dans l'air (ainsi qu'avec la température moyenne globale) puis, par modélisation, on pourra démontrer que cette corrélation correspond à une relation de causalité entre émissions anthropiques et réchauffement.

Nous invitons élèves et enseignants à exploiter la page II du manuel (rabat avant) sur les notions de corrélation et de causalité.

Remarque : une fois les causes anthropiques du réchauffement climatique démontrées, il devient possible de rechercher les solutions à envisager comme cela est l'objet du programme de Terminale spécialité SVT.

► SITUATION 3

L'impact du réchauffement climatique sur la biodiversité est rapidement évoqué par le programme mais ne doit pas pour autant être négligé. En classe de 2^{nde}, les élèves ont vu que la biodiversité actuelle est en situation de crise biologique (6^e extinction) et que le réchauffement climatique, s'il n'en est pas une cause majeure, risque d'aggraver

cette crise. On remobilise ici ces acquis tout en faisant appel aux connaissances de la classe de 1^{re} enseignement scientifique et, éventuellement de 1^{re} spécialité SVT, sur le fonctionnement des écosystèmes.

► Exemple de réponse attendue

Si le changement climatique réduit les surfaces occupées par les forêts de bambous, les pandas risquent de perdre leur principale ressource alimentaire et donc de disparaître. Leur faible rythme de reproduction ne leur permettra pas de compenser ces pertes en s'adaptant à de nouveaux régimes alimentaires par exemple.

De façon générale, le réchauffement climatique peut perturber le fonctionnement des écosystèmes que cela soit au niveau de leurs paramètres physiques et chimiques (température, salinité, oxygénation etc.) qu'au niveau des espèces présentes (espèces invasives par exemple).

Complément

Le réchauffement climatique n'est pas la cause majeure de l'extinction des espèces, mais vient aggraver une situation de crise biologique provoquée par la destruction des habitats naturels, la surexploitation des espèces ou encore les pollutions aux pesticides et aux plastiques.

► En classe de 1^{re} enseignement scientifique

L'activité 4 accordera une place importante aux conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité tant au niveau des écosystèmes continentaux qu'au niveau des écosystèmes aquatiques, en montrant notamment l'incapacité des espèces à répondre à ce changement par migration.

Remarque : le programme de 1^{re} spécialité SVT remobilise les acquis de l'enseignement scientifique en développant par un exemple détaillé (l'écosystème Arctique) les conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité.

ACTIVITÉS

L'**activité 1** est consacrée à la modélisation du système climatique terrestre en proposant aux élèves de réaliser eux-mêmes un modèle climatique très simple, mais permettant de remettre en place les acquis de la classe de 1^{re} enseignement scientifique avant de s'intéresser à la construction et la validation des modèles climatiques utilisés par la communauté scientifique.

Ces modèles sont notamment utilisés pour démontrer la responsabilité humaine du réchauffement climatique en démontrant que la corrélation observée entre les émissions anthropiques de GES et l'évolution de leurs teneurs atmosphériques (ainsi qu'avec la température moyenne globale) est une relation de causalité (**activité 2**). Cette activité peut être menée sous la forme d'un débat autour de la notion de climato-scepticisme.

L'**activité 3** accorde une place essentielle aux travaux du GIEC dont les conclusions constituent un enjeu majeur pour l'avenir de nos sociétés, et introduit les notions de prévisions et de projections climatiques qu'il ne faut pas confondre. Au travers de cette activité, certaines des projections climatiques citées par le programme sont présentées (élévation du niveau marin, évolution de la température moyenne globale, phénomènes climatiques extrêmes).

Enfin, l'**activité 4** montrera que les modifications des régimes de pluie et l'acidification des océans pourront avoir des impacts majeurs respectivement sur la biodiversité continentale et sur la biodiversité océanique. L'incapacité de la majeure partie des espèces à migrer pour trouver de meilleures conditions est démontrée.

p. 62 ■ **ACTIVITÉ 1**

Modéliser le système climatique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Les modèles climatiques s'appuient sur : la mise en équations des mécanismes essentiels qui agissent sur le système Terre ; des méthodes numériques de résolution. Les résultats des modèles sont évalués par comparaison aux observations *in situ* et spatiales ainsi qu'à la connaissance des paléoclimats. »

Savoir-faire : « 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. »

Le **document 1** propose de remobiliser les acquis de la classe de 1^{re} enseignement scientifique sur le fonctionnement du système climatique et qui auront déjà été retravaillés au cours du chapitre précédent. De cette façon, il est possible de focaliser les ressources des élèves sur la notion ciblée : la modélisation climatique.

On utilise pour cela l'application en ligne *Edu'modèles* ainsi qu'un fichier à télécharger permettant

d'accéder à un modèle partiellement construit qu'il reste donc à compléter. Ce logiciel offre la possibilité de concrétiser les relations mathématiques qui relient les différentes variables du modèle par des liens visibles et paramétrables. Une fiche technique de l'utilisation de cet outil est disponible à la page 305 du manuel.

Remarque : il est possible d'utiliser d'autres programmes de modélisation comme Simclimat ou un simple tableur. Ces possibilités sont évoquées au travers des exercices 6, 7 et 8 du chapitre.

^{DOC} 1 Démarche expérimentale

► Exemple de correction

L'objectif est ici de :

- Déterminer la variation de la température moyenne du globe en fonction d'une variation de son bilan radiatif provoquée par des changements de la puissance solaire reçue et/ou par l'intensité de l'effet de serre ou encore de l'albédo.
- Utiliser le modèle pour réaliser quelques exemples d'estimation et de prédiction.

Un fichier du modèle complet est disponible sur le site de ressources de Bordas.
<https://lycee.editions-bordas.fr/9782047337615>

On peut y voir que :

- Pour obtenir un écart de température proche de celui observé dans la réalité, il faut déplacer le curseur de la variable « effet de serre » jusqu'à environ 1,01 (exactement 1,0097 en fonction de la sensibilité du curseur) ce qui signifie que l'effet de serre se serait intensifié de 1 % expliquant le réchauffement actuel.
- Pour produire un réchauffement identique à l'actuel sans faire jouer l'effet de serre, il suffit soit d'augmenter la puissance solaire reçue (de 342 à environ $345 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) soit de diminuer l'albédo (de 0,29825 à 0,29126).
- Dans le cas d'un effet de serre identique à l'actuel, une diminution de l'albédo entraînerait une accentuation du réchauffement (on remobilise ici des acquis du chapitre précédent).

Remarques :

- Il est préférable de réinitialiser le modèle entre chaque manipulation.
- Dans cet exemple, la fiabilité des valeurs obtenues est moins importante que le principe de fonctionnement du modèle et des relations qu'il décrit.
- Dans une certaine mesure, les élèves peuvent explorer les conséquences de variations plus importantes des paramètres dictant la température moyenne globale.

Chaque enseignant est bien évidemment libre de s'approprier le modèle proposé et d'en modifier les variables.

Le **document 2** transpose ce qui aura été compris dans le doc. 1 à l'échelle des modèles climatiques utilisés par les chercheurs (doc. 2a) tout en tenant compte d'un paramètre essentiel aux modèles : leur résolution spatio-temporelle (doc. 2b). Cette résolution détermine le nombre de calculs à effectuer par le modèle : plus les mailles temporelles (qui correspondent à l'état des variables prises en compte pour un point donné au cours du temps) et spatiales (qui correspondent à l'état des variables prises en compte pour différents points à un même instant) sont petites (les points étudiés sont proches spatialement et leur état est suivi sur de courts intervalles de temps) et plus la précision des résultats obtenus sera importante. Afin de limiter les temps de calculs (qui peuvent être de plusieurs semaines ou mois), les modélisations utiliseront des résolutions faibles pour de grandes régions (échelles globale à continentale) et fortes pour de petites régions (échelles nationale ou régionale).

Une vidéo accessible *via* l'application *FlashPAGE* pourra donner un éclairage complémentaire sur ces questions.

Enfin, le doc. 2c montre qu'un modèle se doit d'être vérifié par comparaison à la réalité. On utilise ici l'exemple historique des modèles de Hansen, l'un des premiers scientifiques à utiliser des modèles climatiques pour alerter l'opinion publique sur la réalité du réchauffement en 1988 (année de création du GIEC). On voit ici qu'il est possible de vérifier la validité de ses résultats en les comparant à la réalité qui l'a précédé (de 1960 à 1988) et à la réalité qui lui a succédé (de 1988 à 2017).

► Exemple de correction des pistes de travail

1. La variable $v[7]$ a pour formule $0,565 \times v[6]$. Il s'agit de la conversion du forçage radiatif en écart de température basée sur l'écart observé entre 1750 et 2018 ($1,3/2,3 = 0,565$).

Remarque : il s'agit bien sûr d'une relation simplifiée de celle existant entre ces deux paramètres dans le cadre de notre activité.

2. Pour pouvoir moduler la variable *Effet de serre*, il faudrait ajouter des variables décrivant les teneurs en GES (CO_2 , N_2O , CH_4 et H_2O) et pouvoir évaluer mathématiquement leur contribution respective à l'effet de serre en se basant sur leur concentration et leur PRG (voir chapitre précédent).

Pour la variable *Albédo*, il faudrait ajouter des variables décrivant les proportions des différentes surfaces réfléchissantes du globe (nuages, glaces, déserts, océans, végétation) ainsi que leur valeur d'albédo respective.

Pour que le modèle fonctionne, il faut remplacer les variables d'entrée *Effet de serre* et *Albédo* par des variables dynamiques.

3. On peut proposer le tableau suivant :

Caractéristiques du modèle		Résolution	
		Faible	Forte
Temps de calcul	Régional	+	+++
	Global	+++	+++++
Précision	Régional	+++	+++++
	Global	+	+++

4. On observe que pour les 3 scénarios de Hansen il y a augmentation de la température moyenne globale. Les scénarios A et B reproduisent assez fidèlement l'évolution générale de la température de 1958 à 1990. De même pour le scénario C de 1980 à 1990. Cependant, dans le détail, on voit que les modèles de Hansen s'écartent de la réalité comme, par exemple, en 1975 où ils indiquent une température plus élevée que la réalité.

Les modèles de Hansen (qui datent de 40 ans !) semblent donc fiables à une échelle de temps de quelques décennies, mais beaucoup moins à l'échelle de quelques années. Pour la période 1990-2010, on voit que le scénario C est le plus proche de la réalité. Cependant, pour les années suivantes, aucun de ces scénarios ne reproduit fidèlement la réalité. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'aucun d'entre eux n'a anticipé la réalité des émissions de dioxyde de carbone puisque l'on voit que les teneurs en CO₂ prévues en 2017 sont toutes différentes de la réalité. Enfin, le scénario B qui prévoit une teneur en CO₂ inférieure à la réalité, mais une température plus élevée montre que ces modèles pourraient surestimer le rôle du CO₂ dans le réchauffement.

p. 64 ■ **ACTIVITÉ 2**

Un dérèglement climatique d'origine humaine ?

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. »

Savoir-faire : « Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet. »

Le **document 1** présente de façon synthétique et illustrée l'évolution et l'origine des émissions anthropiques des principaux GES. Un lien vers le site : <http://www.globalcarbonatlas.org/fr/CO2-emissions> permet aussi aux élèves d'étudier l'évolution de ces émissions au cours du temps, pays par pays au moins pour le dioxyde de carbone.

1 Pour mener une investigation

Exemple de correction

D'après le site *Global Carbon Atlas*, les 5 principaux pays émetteurs de GES (et en particulier de CO₂) en 2018 étaient la Chine (avec environ 10 000 Mt de CO₂ émis), les États-Unis (environ 5 400 Mt de CO₂), l'Inde (environ 2 600 Mt de CO₂), la Russie (environ 1 700 Mt de CO₂) et enfin le Japon (environ 1 100 Mt de CO₂). Quant à la France, elle est responsable de l'émission d'environ 340 Mt de CO₂ soit 3,4 % des émissions chinoises.

La 1^{re} place de la Chine s'explique bien sûr par l'importance démographique de sa population. Un critère de comparaison plus judicieux serait donc la quantité de CO₂ émise par habitant, que l'on peut visualiser grâce aux données du site (tout comme les émissions de CO₂ par rapport au PIB du pays). Le tableau ci-dessous présente ces résultats pour les 6 pays cités précédemment.

Pays	Émissions de CO ₂ en tonnes par habitant et par an (pour l'année 2018)	Émissions de CO ₂ en kg de CO ₂ sur le PIB
Chine	7	0,5
États-Unis	17	0,3
Inde	2	0,3
Russie	12	0,5
Japon	9,1	0,2
France	5,2	0,1

On constate ainsi qu'un habitant des États-Unis émet environ 2,4 fois plus de CO₂ qu'un habitant de la Chine.

Remarque : avec ce critère, le Qatar est le premier pays émetteur avec 38 tonnes de CO₂ par habitant !

Les émissions de CO₂ ramenées au PIB indiquent la dépendance de l'économie d'un pays vis-à-vis des combustibles fossiles, principales sources émettrices de CO₂. On voit ainsi que les économies chinoise et russe reposent davantage sur les énergies fossiles que les autres.

Enfin, on peut remarquer, qu'au cours du temps, les émissions de CO₂ pour l'ensemble des pays n'ont cessé d'augmenter depuis les années 60.

Le **document 2** établit la corrélation entre les rejets anthropiques de CO₂, dont la teneur atteinte en 2019 est inédite depuis plus de 770 000 ans et la température dont on peut constater qu'elle est étroitement reliée au taux de CO₂ (les courbes bleue et rouge évoluant parallèlement) et qui,

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Le document 1a donne les émissions annuelles de GES de 1970 à 2017.

Années	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Émissions de GES (en Gt de CO ₂)	22,5	23	25,5	27	29,5	30,5	31	35,5	39,5	42

On peut calculer la quantité moyenne de CO₂ émise par an en faisant, par exemple, la moyenne des émissions totales (causées par l'exploitation de combustibles fossiles, la déforestation et la production de ciments) pour quelques années (voir tableau ci-dessus), soit une moyenne de 30,6 Gt de CO₂ par an.

On peut donc estimer que de 1970 à 2017, soit en 47 ans, les émissions totales à $30,6 \times 47 = 1\,438,2$ Gt de CO₂. Sachant qu'1 Gt de CO₂ équivaut à une augmentation de 0,128 ppm de sa concentration dans l'air (d'après la clé pour réussir), la concentration de CO₂ a donc dû augmenter de 1970 à 2017 de $1\,438,2 \times 0,128 = 184,1$ ppm.

2. D'après le doc. 4 p. 47, on voit que la teneur atmosphérique en CO₂ en 2018 était de 408 ppm contre environ 325 ppm en 1970 soit une augmentation de 83 ppm, ce qui est nettement inférieur à notre résultat précédent. On sait cependant que certains mécanismes permettent d'absorber une partie de nos rejets (puits de carbone forestiers et océaniques). On peut donc estimer que 55 % environ de nos rejets sont assimilés par l'environnement.

3. On observe que la température moyenne globale a varié de façon cyclique depuis 800 000 ans,

pour la période récente, avait tendance à diminuer avant une brutale inversion de cette tendance. Pour des raisons graphiques, il n'a pas été possible de représenter l'évolution des teneurs des autres GES évoqués dans le doc. 1. Les auteurs renvoient le lecteur vers le site <https://www.climatelevels.org/> permettant de visualiser de nombreux paramètres climatiques de façon dynamique et pour différentes échelles de temps.

Le **document 3** exploite les résultats de modèles climatiques qui comparent l'évolution de la température moyenne du globe de 1860 à 2010 en tenant compte ou non des activités humaines et en les comparant à la réalité. Son analyse permet d'expliquer les corrélations précédemment observées par une relation de cause à effet comme le souhaite le programme.

en corrélation avec la teneur en CO₂. On voit aussi que l'augmentation de la teneur en CO₂ est presque toujours légèrement postérieure à celle de température. Le réchauffement actuel pourrait donc n'être que la continuité de ces variations naturelles.

On observe cependant que :

- Le taux de CO₂ actuel est nettement supérieur aux valeurs maximales des derniers 800 000 ans.
- Depuis -10 000 ans, la tendance était à un refroidissement climatique qui s'est brutalement inversé très récemment.
- L'augmentation actuelle de la température est simultanée de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'air.

Ces observations laissent à penser que le réchauffement actuel n'est pas naturel.

4. On voit que l'évolution réelle de la température correspond aux simulations qui intègrent les rejets anthropiques de GES alors que les simulations qui ne tiennent pas compte de nos rejets indiquent une stabilisation de la température.

On peut donc dire que le réchauffement actuel est bien lié aux activités humaines émettrices de GES.

Les projections climatiques

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES : une augmentation de 1,5 à 5 °C de la température moyenne entre 2017 et la fin du **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 événements climatiques extrêmes. »

Savoir-faire : « Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet. »

Cette activité illustre l'enjeu majeur que constituent les travaux du GIEC vis-à-vis de l'anticipation des risques liés au changement de climat et des actions à mener qui en découlent (programme de terminale spécialité SVT).

Le **document 1** explique les différences entre une prévision climatique qui ne dépend que des paramètres climatiques scientifiquement connus et relativement faciles à prévoir et une projection climatique qui dépend des prévisions climatiques combinées à différents scénarios d'émissions anthropiques de GES. Ces scénarios, nombreux, sont regroupés en 4 grandes catégories nommées scénarios RCP2,6 ; RCP4,5 ; RCP6 et RCP8,5 où la valeur chiffrée correspond à la valeur du forçage radiatif prévue en 2100.

Comme l'illustre le graphique, ces scénarios reposent sur des hypothèses différentes d'évolutions technologique, énergétique, démographique mais aussi économique et politique qui sont difficilement prévisibles ; en conséquence, les résultats des projections climatiques varient naturellement d'un modèle à l'autre. Il s'agit là d'un point essentiel à faire comprendre aux élèves car les écarts présentés par les différents modèles (qui démontreraient leur faible fiabilité) sont souvent utilisés comme un argument climato-sceptique contre lequel il est essentiel de lutter.

Le **document 2** illustre deux des points du programme : l'évolution de la température moyenne

globale sur le siècle en cours mais aussi les siècles suivants (doc. 2a), l'élévation du niveau marin (doc. 2b), pour différents scénarios RCP et plusieurs dizaines de modèles.

On remarquera que pour tous les scénarios envisagés, les modèles prévoient une hausse de ces deux paramètres pour la fin du siècle (ou au moins une stabilisation de la température pour le scénario RCP2,6).

Le **document 3** s'intéresse à la modification de la fréquence des phénomènes climatiques extrêmes qui font souvent l'objet de débats au sein de la communauté scientifique sachant que les enjeux associés sont des plus importants (risque sanitaire, voir le programme de spécialité SVT). Le doc. 3a tente donc d'apporter des éléments de réponse sur l'exemple des ouragans suivis dans l'océan Atlantique alors que le doc. 3b s'intéresse à l'exemple des canicules en France métropolitaine. C'est ici l'occasion de rappeler aux élèves le triste record de surmortalité estivale atteint en 2003 et de leur faire explorer, en autonomie, les résultats des modèles climatiques de Météo France dans leur région sur ce paramètre, ou d'autres, *via* le site <http://www.drias-climat.fr/>.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Du scénario RCP2,5 au scénario RCP8, la mise en place d'une politique globale de développement durable diminue.

Ce type de politique suppose d'augmenter le recours aux énergies renouvelables (biomasse, hydraulique, solaire, géothermie et éolien) comme c'est le cas pour le scénario RCP2,6 et, dans une moindre mesure pour RCP4,5. Elles sont très peu utilisées dans le scénario RCP6 mais autant dans le scénario RCP8 que RCP2,6. Cependant, la consommation d'énergie totale en RCP8 est le double qu'en RCP2,6 ce qui signifie que les énergies renouvelables ne représentent finalement qu'une faible fraction des ressources disponibles.

Les ressources fossiles sont toujours majoritairement utilisées et de plus en plus du RCP2,6 au RCP8 ce qui explique des teneurs en GES en 2100 croissantes (en RCP8,5, elle est 3,5 fois supérieure à sa teneur en RCP2,6).

Enfin, en RCP2,6 et 4,5, la population mondiale atteint les 9 milliards d'habitants, 10 en RCP6 et 12 en RCP8.

Une limitation de notre consommation d'énergie et de nos émissions de GES passe donc par une diminution de notre croissance démographique.

2. Dans le scénario 2,6 la température globale moyenne atteint en 2100 un écart de température par rapport à la moyenne 1986-2005 de + 0,9 °C environ, de + 2 °C et + 2,5 °C pour RCP4,5 et 6 et de + 4 °C pour RCP8.

En tenant compte de l'ensemble des résultats, on peut s'attendre à un écart allant de + 0,25 °C à 5,25 °C, ce qui montre une forte imprécision des résultats. Dans tous les cas, on constate une augmentation de la température moyenne.

En 2300, les projections indiquent un écart nul pour RCP2,6 et un écart de +8 °C pour RCP8.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs trouvées :

Décennies	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009
Fréquence annuelle moyenne des ouragans (force 1 à 5)	6,9	6,1	4,9	5,2	6,4	7,5
Fréquence annuelle moyenne des ouragans (force 1 à 5)	3,9	2,8	1,6	1,7	2,5	3,6

On constate une tendance à la diminution de la fréquence moyenne des ouragans jusqu'à la décennie 70, période à partir de laquelle cette fréquence augmente. Parallèlement, on peut faire la même observation pour ce qui est des ouragans de forte puissance.

Or on sait que la température moyenne globale s'était stabilisée sur la période 1940-1970 avant d'augmenter jusqu'à aujourd'hui (revoir le document 2 p. 42), ce qui semble donc confirmer la tendance prévue par les climatologues.

On peut se poser la question de savoir si les résultats seraient similaires en considérant d'autres décennies (1955-1964 par exemple).

4. En France, on peut prévoir que, dans le cas du scénario RCP8,5, le nombre de jours de canicules sera très supérieur aux périodes précédentes avec par exemple des périodes de 25 à 30 jours sur à peu près un tiers du territoire (Grand-Est et Massif central). De plus, les températures maximales seront sans doute supérieures à celles des canicules actuelles.

Il y a donc un réel risque sanitaire tant les effets d'une canicule peuvent être dangereux sur les populations fragiles (nourrissons et personnes âgées).

De fortes chaleurs associées aux sécheresses laissent aussi craindre des risques élevés d'incendies de forêts ou de cultures.

5. Ces projections ont comme intérêt de nous permettre de prendre la mesure des risques

Pour ce qui est du niveau marin, on observe pour la presque totalité des surfaces océaniques une élévation du niveau marin majoritairement de 0,4 à 0,5 m pour la période 2081-2100 en RCP2,6 et de 0,6 à 0,7 m en RCP8. Au maximum, elle serait de 0,6 m en RCP2,6 et de 0,9 m en RCP8.

3. Pour calculer une fréquence annuelle moyenne par décennie, il faut dénombrer le nombre total d'ouragans de chaque catégorie sur une décennie puis diviser par 10.

climatiques à venir et donc de mettre en place les solutions de limitation des émissions de GES comme dans le scénario RCP2,6 et/ou des mesures pour supporter les risques climatiques que l'on ne pourra éviter.

p. 68 ■ **ACTIVITÉ 4**

Réchauffement climatique et biosphère

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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.

Les modèles s'accordent à prévoir, avec une forte probabilité d'occurrence, dans des fourchettes dépendant de la quantité émise de GES : des modifications des régimes de pluie ; une acidification des océans ; un impact majeur sur les écosystèmes terrestres et marins. »

Savoir-faire : « Exploiter les résultats d'un modèle climatique pour expliquer des corrélations par des liens de cause à effet. »

Les conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité actuelle et l'aggravation de la crise qu'elle subit constituent un enjeu majeur pour nos sociétés.

Le **document 1** s'intéresse aux peuplements végétaux métropolitains qui constituent un élément clé de nos paysages mais aussi de notre activité économique (tourisme, filières forestières).

Le doc. 1a présente les grandes provinces bioclimatiques définies par les exigences climatiques des espèces qui constituent leurs associations végétales respectives. L'élève est donc amené à comparer ces exigences climatiques avec la modification du régime des précipitations et des températures prévus en été et en hiver, selon un scénario « moyen » donc probable de cette évolution. La mise en relation de ces données permet de comprendre et d'expliquer comment il est possible de prévoir l'évolution de ces provinces climatiques (doc. 1c). On peut ainsi montrer que si certaines espèces pourront accroître leurs aires de répartition grâce au changement de climat (C et D par exemple), de nombreux autres peuplements seront amenés à presque disparaître (B et E par exemple).

La notion de migration des espèces en tant que réponse au changement de climat est introduite. Il est ici nécessaire d'être vigilant quant à ce que peut signifier pour l'élève le terme « migration » pour des espèces végétales.

Le **document 2** traite de certaines conséquences du réchauffement dans le domaine océanique *via* l'exemple assez médiatisé et emblématique des récifs coralliens (dont l'enjeu est clairement indiqué) qui souffrent d'une part de l'augmentation de la température moyenne des océans (doc. 2a) et, d'autre part, de l'acidification des océans (doc. 2b). Une animation *Edumedia* explicite les effets de la température sur ces coraux.

Enfin, le **document 3** a pour vocation de réaliser la synthèse des cas précédents en comparant les vitesses de migration de différentes espèces animales ou végétales, continentales ou aquatiques à la vitesse de déplacement des provinces bioclimatiques. Plusieurs difficultés sont ici à surmonter pour nos élèves :

- La signification des barres horizontales qui illustrent, pour un groupe d'espèces donné, la diversité des vitesses de chacune d'entre elles.
- La signification de la médiane (expliquée dans le texte) à ne pas confondre avec une moyenne (donnée absente pour les coraux).
- La nécessité de comparer les valeurs du tableau avec celle du graphique.

Une fois ces difficultés levées, la compréhension du document est assez simple et ne nécessite qu'un peu de rigueur.

On voit ainsi que, dans certains cas, même les groupes disposant de bonnes capacités migratoires risquent de ne pas être assez rapides pour échapper aux changements des conditions de leur milieu de vie.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. On observe sur le doc. 1b une disparition presque totale des associations végétales E et F alors que les peuplements G se maintiennent en zones montagneuses.

L'association végétale B a, elle aussi, presque disparu et se maintient dans quelques secteurs de l'Est, notamment à la place du peuplement E (Vosges). Elle est remplacée par les peuplements A du Nord à l'Est et par le peuplement C dans les parties centrales, ce dernier ayant aussi gagné de nouveaux territoires en bordure Atlantique. S'il se maintient en Aquitaine, il est remplacé par le peuplement D dans les zones plus continentales. Ce dernier s'est largement étendu.

Au niveau climatique, on prévoit globalement en 2100 une augmentation de la température moyenne en été (entre 1,5 et 3 °C essentiellement dans le Sud et le Centre) et en hiver (de 1,5 à 2,5 °C essentiellement dans le Centre et dans l'Est, du Nord au Sud).

En hiver, une large partie Nord serait plus humide mais plus sèche dans le Sud. En été, les précipitations sont moins élevées sur l'ensemble du territoire notamment dans les zones montagneuses. Sachant que les peuplements E et F sont acclimatés à des environnements doux ou frais et à une bonne pluviométrie, on peut penser que l'augmentation de la température leur serait défavorable tout comme le manque d'humidité estivale. Le peuplement G se réfugiant en altitude où les températures resteraient plus basses. L'augmentation de la pluviométrie dans la partie nord et l'augmentation de la température sont défavorables au peuplement B adapté à des environnements peu humides et aux hivers froids. Ces conditions conviennent par contre au peuplement A qui le remplace mais surtout au peuplement C. Enfin, le peuplement typiquement méditerranéen profite de la diminution des précipitations et de la forte augmentation des températures dans toute la partie sud du pays.

2. On sait que la température moyenne des océans va augmenter. Or, des températures trop élevées peuvent faire mourir les coraux. Ils

sont d'autant plus menacés que l'on prévoit une acidification des océans, par dissolution du CO₂ dans l'eau, jusqu'à 8,05 dans le cas du scénario le plus optimiste (RCP2,6) jusqu'à 7,75 dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP8,5). Or, des eaux acides ralentissent la croissance des coraux jusqu'à la stopper pour un pH de 7,7. Les peuplements coralliens sont donc gravement menacés par le réchauffement climatique.

3. Face à des modifications de l'environnement, les êtres vivants peuvent se déplacer dans de nouveaux territoires soit pour retrouver des conditions favorables (cas des peuplements A et C) soit pour profiter des conditions nouvellement installées (peuplement D et C). Enfin, certaines populations risquent de disparaître, au moins localement (peuplements B, E et F, coraux).

4. Si la valeur de la vitesse du changement des conditions climatiques est supérieure à la vitesse de migration des espèces, cela signifie qu'elles ne seront pas capables de trouver des conditions favorables dans d'autres territoires. Dans le cas du domaine continental et du scénario RCP2,6, on constate que la vitesse moyenne de changement des conditions environnementales est nulle, ce qui signifie que le climat s'est stabilisé, ce qui n'est pas le cas pour le domaine océanique. En effet, dans ce cas, une majorité des poissons osseux ou cartilagineux serait impactée.

Dans le cas du scénario RCP4,5, la totalité des arbres se révélerait incapable de migrer suffisamment vite, ainsi que plus de la moitié des espèces de plantes herbacées et des rongeurs. Cela conduirait à un véritable changement des paysages. Dans le domaine océanique, ce scénario conduirait à la disparition des coraux, des crustacés et de l'ensemble des poissons.

Les projections climatiques permettent donc d'évaluer la vitesse des changements climatiques et de montrer que certaines espèces ne pourront pas y échapper, d'où un risque accru d'extinction.

CORRECTION DES EXERCICES

p. 73 ■

Vérifier ses connaissances

1 Question à réponse unique

A- 4

Une résolution élevée correspond à un découpage spatio-temporel fin d'un territoire donné. Autrement dit, les calculs seront faits fréquemment pour des portions de territoires de petite taille d'où une précision importante des résultats. Attention, cette précision n'est pas synonyme de fiabilité.

B- 3

On peut classer ces différentes activités de la plus émettrice à la moins émettrice de GES : 3>2>4>1.

C- 4

La valeur qui figure sur le nom du scénario RCP correspond au forçage radiatif dû aux activités humaines en 2100. Une valeur élevée conduit donc à un réchauffement élevé.

D- 1

La réponse 2 est fautive car les espèces capables d'évoluer vite pourront s'adapter au changement de climat donc survivre tout comme les espèces capables de migrer plus vite que le réchauffement (réponse 4). Les espèces capables de s'accommoder de conditions variables peuvent aussi survivre.

2 Restituer les notions essentielles du cours

a. La fiabilité d'un modèle climatique peut être vérifiée par comparaison des résultats qu'il fournit à la réalité ; on peut soit demander au modèle de reproduire une évolution passée et connue du climat, soit demander de réaliser des prévisions qui seront vérifiées au cours des années qui suivent. En cas d'écart important à la réalité, le modèle sera amené à être corrigé.

b. Une prévision climatique ne s'appuie que sur des données scientifiques décrivant le fonctionnement du système climatique (évolution de la température, de la pression, de l'intensité de l'effet de serre, des flux de carbone entre réservoirs, de l'importance de l'albédo etc.) et sur leur évolution prévisible.

Une projection climatique module les résultats d'une prévision en tenant compte de paramètres non climatiques et imprévisibles comme l'évolution des technologies, de la démographie, de l'économie, de la volonté des politiques etc.

Depuis 2014, le GIEC regroupe ses différentes projections sous la forme de scénarios RCP qui décrivent différentes sociétés futures se différenciant notamment par le recours ou non aux énergies renouvelables, une démographie globale en hausse ou en baisse et une politique globale menée en faveur du développement durable ou non.

c. La modélisation du climat est un enjeu majeur car elle permet d'anticiper, par exemple, les risques encourus par les populations humaines en termes de phénomènes climatiques extrêmes (sécheresse, canicule, vagues de froids, tempêtes et ouragans divers). Les risques étant connus, des mesures pourront être prises préventivement pour limiter ces risques.

Les auteurs invitent les élèves intéressés n'ayant pas choisi la spécialité SVT à consulter le manuel correspondant qui présente d'autres risques associés au changement de climat (expansion de maladies tropicales, pertes de rendements agricoles) et qui envisage différentes solutions sous la forme de stratégies d'adaptations et/ou d'atténuation.

d. On sait que l'utilisation massive de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) depuis la révolution industrielle de la fin du XIX^e siècle est à l'origine d'une augmentation de la teneur en GES inédite depuis 800 000 ans. On peut ajouter comme causes essentielles aux rejets de GES la déforestation et le développement de l'agriculture intensive. Outre le dioxyde de carbone (CO₂), cette dernière est notamment à l'origine de rejets importants de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O).

Cette augmentation est corrélée à une augmentation de la température moyenne globale. Or, les modèles montrent que sans activités humaines cette température moyenne aurait dû rester relativement stable sur les 150 dernières années. Ceci suffit à démontrer une relation de causalité entre les rejets anthropiques de GES et le réchauffement observé.

3 Connaître les abréviations, sigles et unités utiles

Ppm : Parties par million (soit 1×10^{-6}) et ppb : parties par milliard (soit 1×10^{-9}). Ces unités sont utilisées pour quantifier les teneurs en GES de l'atmosphère ; 100 ppm reviennent à 0,01 %.

RCP : « Representative Concentration Pathway » ou profils représentatifs de l'évolution des concentrations (en GES). Il en existe 4 différents regroupant chacun à un grand nombre de variantes.

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts de l'évolution du Climat. Fondé sous l'égide de l'ONU et de l'OMM en 1988.

PRG : Pouvoir de réchauffement global. Par convention, le PRG du CO₂ est de 1 et on lui compare les autres GES (H₂O, N₂O et CH₄). Ce PRG est calculé pour une période de 100 ans et dépend des propriétés physiques du gaz, de sa concentration et de son temps de résidence dans l'air.

éqCO₂ : Équivalent en dioxyde de carbone. D'après son PRG, 1 kg de CH₄ équivaut à 28 kg d'éqCO₂.

GES : Gaz à effet de serre.

4 Retour sur les problématiques

• Comment prévoir l'évolution du climat de la Terre ?

On prévoit l'évolution du climat de la Terre en construisant des modèles numériques capables de décrire l'évolution du système climatique de la Terre. La fiabilité de ces modèles est testée en comparant les résultats qu'ils fournissent à la réalité (passée ou celle s'étant écoulée entre le résultat fourni et aujourd'hui). Leur précision dépend des résolutions spatiales et temporelles employées. En tenant compte de différents scénarios d'émissions de GES par l'Homme (scénarios RCP), ces modèles établissent des projections climatiques qui sont autant de futurs climatiques possibles. Ces projections peuvent être traduites sous la forme de carte ou de graphiques.

• Quels sont les arguments en faveur d'une responsabilité humaine face au récent changement de climat ?

On peut établir, par simple calcul, que les émissions de GES liées aux activités humaines sont quantitativement suffisantes pour entraîner une élévation de leur teneur atmosphérique. Cette dernière est d'ailleurs temporellement corrélée à la révolution industrielle et au début de l'exploitation massive des combustibles fossiles. Elle est inédite dans l'histoire de la Terre tant en termes de valeur atteinte que de rapidité de mise en place.

On sait que ces GES sont responsables de l'élévation de la température moyenne de la Terre.

Enfin, les modèles climatiques montrent que, sans activités humaines, le climat terrestre n'aurait pas dû connaître de réchauffement.

• Quelles sont les conséquences actuelles et futures du réchauffement climatique ?

On peut donc dire que l'Homme est responsable du changement de climat actuel. Les conséquences actuelles et futures du réchauffement climatique sont :

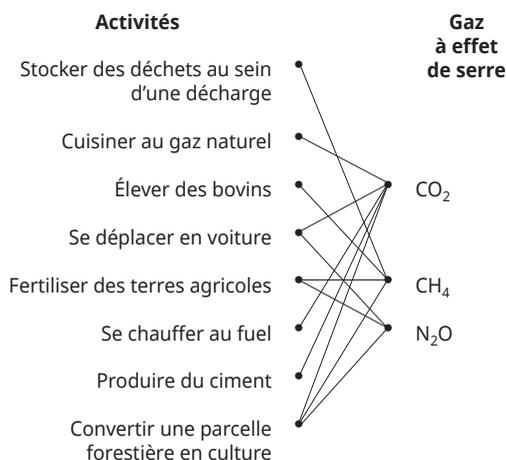
- une augmentation de la température atmosphérique moyenne de 1,5 à 5 °C d'ici la fin du siècle ;
- une élévation du niveau moyen des océans pouvant atteindre 1 mètre ;
- une augmentation de la température et une acidification des océans ;
- une modification de la répartition et de l'intensité des précipitations ;
- des changements dans la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes

(sécheresse, vagues de chaleur ou de froid, ouragans et tempêtes, etc.).

L'ensemble des modifications des conditions environnementales sont à même de perturber gravement le fonctionnement des écosystèmes terrestres et marins, d'aggraver la disparition des espèces et de menacer les activités humaines.

Les auteurs invitent les élèves intéressés n'ayant pas fait le choix de l'enseignement de spécialité SVT à consulter le manuel correspondant où ils pourront trouver quelques développements quant aux conséquences du réchauffement climatique sur la biodiversité et les activités humaines ainsi que des solutions possibles.

5 Mettre en relation ses connaissances



p. 75 ■

Exercice similaire

7 Modélisation de l'élévation future du niveau marin

Le site ressource met à disposition un exemple de correction sous la forme d'un fichier tableur. <https://lycee.editions-bordas.fr/9782047337615>

1. Le tableau ci-dessous indique les formules à utiliser au sein d'un tableur pour les cellules demandées :

Cellules	Formules possibles
B3	=B2*1
C3	=C2+B3
F3	=F2*1
G3	=G2+F3

2. Dans cette situation, on aboutit à une élévation du niveau de la mer de 20,78 cm.

3. Pour simuler une amplification du réchauffement climatique de 1 % par an, il suffit de modifier les formules des cellules B3 et F3 comme suit :
 B3 : =B2*1,01
 F3 : =F2*1,01

4. Dans ce cas, l'élévation du niveau marin en 2100 s'établit à 35,63 cm.

5. En modifiant petit à petit la valeur du coefficient par lequel on module l'intensité du réchauffement, on obtient une élévation du niveau de la mer de 101,22 cm pour des valeurs des cellules B3 et F3 de :

B3 : =B2*1,0265

F3 : =F2*1,0265

soit une amplification de 2,65 % par an.

Ce dernier résultat montre qu'une faible accentuation de l'effet de serre peut avoir des conséquences d'une toute autre amplitude sur le niveau marin. Enfin, les derniers modèles indiquent que le changement de climat s'autoamplifie à un rythme plus élevé que la valeur indiquée.

p. 75 ■

S'entraîner

8 L'importance des rétroactions climatiques

Cet exercice s'appuie sur les connaissances acquises dans le chapitre précédent.

Pour déterminer si une rétroaction accentue ou modère le réchauffement, on doit comparer la valeur de température obtenue avec l'ensemble des rétroactions soit 18,8 °C (courbe rouge) avec la valeur prévue en 2100 sans cette rétroaction. Si la différence entre ces deux valeurs est positive, alors cette rétroaction est à l'origine d'une modération du réchauffement et inversement.

Le phénomène ayant le plus grand impact sur le réchauffement lui-même serait la variation des surfaces végétalisées (ce qui démontre qu'il s'agit d'un levier d'action important pour lutter contre le réchauffement climatique).

Remarques :

- D'après ce modèle, la variation de l'albédo que connaîtra la Terre d'ici 2100 ne suffit pas à influencer la température moyenne globale. Ses effets pourront se faire ressentir sur une plus longue période.

- Du fait de l'augmentation rapide et élevée du taux de CO₂ atmosphérique, la dissolution du CO₂

augmente (d'où l'acidification des océans) bien que l'augmentation de la température des eaux (encore trop faible) devrait la limiter.

• L'élévation de la teneur atmosphérique en CO_2 favoriserait la photosynthèse d'où une rétroaction négative.

• L'augmentation de la température entraînerait une plus forte évaporation de l'eau qui est le GES essentiel : c'est donc une rétroaction positive.

Exemple de tableau des résultats :

Rétroactions	Températures prévues en 2100 (en °C)	Écarts de température par rapport à la simulation où toutes les rétroactions sont actives	Interprétations
Albédo	18,8	$= 18,8 - 18,8$ $= 0$	Une variation de l'albédo provoquée par le réchauffement climatique n'accroît et ne modère pas ce réchauffement.
Dissolution du CO_2	19,6	$= 19,6 - 18,8$ $= 0,8$	Une variation de la quantité de CO_2 dissous provoquée par le réchauffement climatique modère ce réchauffement. C'est donc une rétroaction négative.
Végétation	20,1	$= 20,1 - 18,8$ $= 1,3$	Une variation de la surface végétalisée provoquée par le réchauffement climatique modère ce réchauffement. C'est donc une rétroaction négative.
Vapeur d'eau	17,7	$= 17,7 - 18,8$ $= -1,1$	Une variation de la concentration atmosphérique en vapeur d'eau provoquée par le réchauffement climatique accroît ce réchauffement. C'est donc une rétroaction positive.

9 Des canicules de plus en plus redoutées

La lecture attentive du graphique indique que les bonnes réponses sont :

1. d.

Il s'agit en effet du cercle bleu de plus grande taille : on tient à la fois compte de la valeur maximale de la température atteinte et de la durée de l'épisode.

2. d.

On peut observer que les points rouges s'alignent globalement sur une droite croissante.

3. c.

On observe 26 points bleus qui correspondent à 26 canicules entre 1947 et 2017 soit en 70 ans d'où une fréquence d'environ 3,7 épisodes par décennie (26/7).

4. b.

On dénombre 64 points rouges prévus pour une période allant de 2071 à 2100 soit sur 29 ans d'où une fréquence de 22 épisodes par décennies (64/2,9).

10 Les conséquences de l'acidification des océans

On observe dans le cadre du scénario RCP8,5 que l'ensemble des eaux océaniques de la planète s'acidifie d'ici la fin du siècle avec des variations de pH allant de $-0,3$ à $-0,35$ au niveau équatorial à $-0,55$ au niveau Arctique. Or, on sait que les océans absorbent une partie de nos émissions de CO_2 par dissolution. On peut donc supposer que cette variation de pH est liée à la concentration croissante des eaux océaniques en CO_2 .

On voit également sur la carte que l'ensemble des zones de pêche de mollusques et crustacés sont concernées tout comme les récifs coralliens d'eau froide ou d'eau chaude. Cette acidification des eaux peut affecter la santé des organismes marins dont on sait qu'ils sont nombreux à produire des carapaces ou coquilles en carbonate de calcium qui se fragilisent en milieu acide.

On voit sur les histogrammes que, dans la situation du scénario RCP8,5 qui prévoit une teneur en CO_2 dans l'air de 850 ppm, ce qui correspond à environ 850 μatm , l'effet est majoritairement négatif pour environ 50 % des mollusques, 20 %

des crustacés, 35 % des récifs d'eau froide et 50 % des récifs d'eau chaude.

Nos émissions de CO₂ sont donc à même de réduire la biodiversité marine dont dépendent nos activités de pêche.

11 **Prépa BAC** Une évolution du peuplement en poissons du Golfe de Gascogne

1. Sur doc. a, on observe trois tendances différentes :

- Une stabilité des effectifs de poissons d'espèces tempérées.
- Une légère augmentation des effectifs des espèces boréales.
- Une forte augmentation des effectifs des espèces subtropicales.

2. D'après le doc. b, le réchauffement climatique entraîne une élévation de la température des eaux (d'environ 11,5 à 12,25 °C en 28 ans), ce qui peut favoriser les espèces subtropicales, d'où l'hypothèse des chercheurs. Cependant, cela devrait défavoriser les espèces boréales, d'où la seconde hypothèse. Les espèces boréales sont davantage pêchées au contraire des espèces subtropicales plus petites. Or, les premières s'alimentent à partir des secondes. Étant moins consommées et moins pêchées également, l'effectif des espèces subtropicales augmente.

3. Le modèle qui est une représentation simplifiée de la réalité présente comme différences :

- L'utilisation de 3 espèces représentant chacune l'un des groupes étudiés contre 113 espèces dans la réalité dont plus de la moitié appartient au groupe des espèces subtropicales (contre 1/3 dans le modèle).
- Le modèle prévoit une augmentation de la température des eaux de 0,5 °C par an sur 4 ans, soit une élévation de 2 °C de loin supérieure à la réalité (0,1 °C environ en 4 ans).
- Le paramètre testé par le modèle est le réchauffement, sauf la pêche qui est présente dans la réalité mais absente du modèle.

4. Sans réchauffement, les effectifs des trois populations sont relativement stables pour le merlan (espèce boréale) et le petit tacaud (espèce tempérée), alors que celui du chinchard (espèce subtropicale) augmente sur l'ensemble de la période. Ces résultats sont donc relativement proches de la réalité.

Avec réchauffement, les effectifs de toutes les espèces sont globalement supérieurs à la situation sans réchauffement, ce qui peut s'expliquer par l'influence positive de la température sur la physiologie de la reproduction de ces poissons.

On observe ensuite que de 1 à 1,5 années, l'effectif des populations de merlans augmente tout comme celui des petits tacauds, alors que celui des chinchards stagne ou augmente faiblement. Cette situation est donc différente de la réalité pour deux des groupes (espèces subtropicales et tempérées).

À partir de 1,5 année, les tendances changent considérablement : la population de petits tacauds diminue, alors que celle des chinchards augmente fortement (ce qui peut expliquer la chute des tacauds consommés par les chinchards) et celle des merlans stagne, voire diminue. Il semble donc que, passé un certain seuil de réchauffement (+ 0,75 °C), l'espèce subtropicale profite de ce changement et se développe rapidement, privant les merlans de l'une de leurs ressources alimentaires. Les merlans ne semblent pas profiter de la démographie des chinchards : on peut supposer que le réchauffement pénalise leur capacité de reproduction.

Là encore cette situation est différente de la réalité pour deux des groupes (espèces boréales et tempérées). Ces résultats montrent donc que la simulation qui ressemble le plus à la réalité est celle sans réchauffement. On pourrait donc invalider l'hypothèse d'une cause climatique de l'évolution des effectifs de ces espèces.

5. Il faut réaliser des simulations de la variation des effectifs de ces espèces à température constante (faible et/ou élevée) avec et sans pêche.

Énergie, choix de développement et futur climatique

LE PROGRAMME

1. Science, climat et société

1.4 – Énergie, choix de développement et futur climatique

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.</p> <p>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 (N_2O, O_3, 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).</p> <p>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).</p> <p>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</p>	
<p>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>	

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ

■ p. 78

SITUATION 1

Cette situation permet de revenir sur la signification de la puissance et de l'énergie et sur la relation qui les lie.

Exemple de réponse attendue

Durant 6 h, l'énergie consommée par l'ampoule LED est : $E = P \cdot t$

$$E = 4,0 \times 6 \times 60 \times 60$$

$$E = 8,6 \times 10^4 \text{ J.}$$

L'ampoule LED est donc plus économe que l'ampoule fluocompacte qui consomme pendant la même durée $3,24 \times 10^5 \text{ J}$.

En classe de T^{le} enseignement scientifique

L'activité 1 permettra de comparer quelques ordres de grandeur d'énergie et de puissance et d'utiliser d'autres unités (kWh, TEP) selon l'ordre de grandeur des énergies considérées.

SITUATION 2

Cette situation permet de revenir sur les calculs de masse moléculaire et du nombre de molécules dans un échantillon (vu en classe de Seconde).

Exemple de réponse attendue

Masse d'une molécule de saccharose :

$$m_{\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} = 12 \times m_{\text{C}} + 22 \times m_{\text{H}} + 11 \times m_{\text{O}}$$

$$m_{\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} = 12 \times 1,99 \times 10^{-23} + 22 \times 1,67 \times 10^{-24} + 11 \times 2,66 \times 10^{-23}$$

$$m_{\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} = 5,68 \times 10^{-22} \text{ g}$$

Un morceau de 5,95 g de saccharose contient donc :

$$\frac{5,95}{5,68 \times 10^{-22}} = 1,05 \times 10^{22} \text{ molécules.}$$

En classe de T^{le} enseignement scientifique

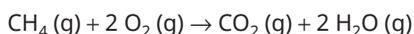
Dans l'activité 2, les élèves compareront différents combustibles en calculant la masse de dioxyde de carbone produite par la combustion de chacun d'eux (à quantité d'énergie libérée égale).

SITUATION 3

Cette situation permet de revenir sur les réactions de combustion au travers de celle du méthane et de son équation (vues au collège et en classe de Seconde).

Exemple de réponse attendue

L'équation de la réaction qui modélise la combustion du méthane est :



Les réactifs sont le méthane CH_4 (g) et le dioxygène O_2 (g). Les produits sont le dioxyde de carbone CO_2 (g) et l'eau H_2O (g).

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

L'activité 4 permettra de sensibiliser les élèves aux moyens de minimiser les émissions de dioxyde de carbone qui est le principal gaz à effet de serre.

ACTIVITÉS

Les élèves découvrent dans l'**activité 1** d'où provient l'énergie consommée dans le monde et à quelles fins elle est consommée. Ils utilisent les différentes unités de l'énergie (J, kWh et TEP) à diverses échelles et pour divers ordres de grandeurs et observent le doublement de la consommation mondiale d'énergie dans les 40 dernières années.

L'**activité 2** a pour objectif de calculer et comparer la masse de dioxyde de carbone dégagée par la combustion de carburants, tandis que l'**activité 3** permet d'analyser l'impact de la pollution de l'air sur la santé.

L'empreinte carbone est définie dans l'**activité 4**. Les élèves sont amenés à calculer leur empreinte carbone à l'aide d'une animation. Ils comparent aussi l'empreinte carbone de voiture thermique et électrique sur l'ensemble de leur cycle de vie et analysent l'empreinte carbone de différents modes de transports en considérant l'efficacité énergétique de chacun de ces modes.

Dans l'**activité 5** enfin, les élèves analysent l'impact de l'augmentation du CO_2 sur le développement de la végétation et différents scénarios de transition écologique.

p. 80 ■ **ACTIVITÉ 1**

L'énergie dans le monde

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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.

La croissance de la consommation globale (doublement dans les 40 dernières années) est directement liée au modèle industriel de production et de consommation des sociétés.

En moyenne 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.

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). »

Savoir-faire : « Utiliser les différentes unités d'énergie employées (Tonne Équivalent Pétrole (TEP), kWh...) et les convertir en joules - les facteurs de conversion étant fournis.

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

Comparer quelques ordres de grandeur d'énergie et de puissance : corps humain, objets du quotidien, centrale électrique, flux radiatif solaire... »

Le **document 1** rappelle les notions de puissance et d'énergie, présente des unités couramment utilisées et donne quelques ordres de grandeurs.

Le **document 2** concerne l'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde, tandis que le **document 3** présente les secteurs qui utilisent principalement l'énergie finale dans le monde.

Enfin, le **document 4** permet de comparer la consommation d'énergie primaire de deux pays, la France et le Brésil en fonction de leur produit intérieur brut et de leur nombre d'habitants.



1 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• $\frac{P_{\text{réacteur nucléaire}}}{P_{\text{four micro-onde}}} = \frac{1 \times 10^9}{1 \times 10^3} = 1 \times 10^6$. Un réacteur nucléaire en fonctionnement peut alimenter un million de fours à micro-onde.

• Durant deux mois, si on considère qu'un cycliste pédale 6 h par jour, chacun des cyclistes produit une énergie égale à $E_{1 \text{ cycliste}} = 2 \times 30 \times 6 \times 0,1 \text{ kWh}$.

Donc le nombre de cyclistes développant autant d'énergie que le foyer en consomme est :

$$\frac{E_{\text{foyer}}}{E_{1 \text{ cycliste}}} = \frac{318}{2 \times 30 \times 6 \times 0,1} = 9 \text{ cyclistes.}$$

► Exemple de correction des pistes de travail

1. D'après le document 2, la consommation d'énergie primaire dans le monde est passée de

$6,2 \times 10^3$ MTEP en 1977 à $12,4 \times 10^3$ MTEP en 2017, elle a donc bien doublé dans les 40 dernières années.

De plus, le document 2 indique que les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) représentent $34,2 + 23,4 + 27,6 = 85,2\%$ de cette énergie primaire.

2. • Énergie finale consommée par le secteur des transports $E_{\text{Transports}}$:

Conversion en joules :

$$E_{\text{Transports}} = 2,82 \times 10^9 \times 4,1868 \times 10^{10} = 1,18 \times 10^{20} \text{ J.}$$

Part des transports dans la consommation d'énergie finale :

$$\frac{1,18 \times 10^{20}}{4,07 \times 10^{20}} = 29\%.$$

• Énergie finale consommée par le secteur de l'habitat E_{Habitat} :

Conversion en joules :

$$E_{\text{Habitat}} = 3,28 \times 10^{13} \times 3,60 \times 10^6 = 1,18 \times 10^{20} \text{ J.}$$

Part de l'habitat dans la consommation d'énergie finale :

$$\frac{1,18 \times 10^{20}}{4,07 \times 10^{20}} = 29\%.$$

• Énergie finale consommée par le secteur de l'industrie :

Part de l'industrie dans la consommation d'énergie finale :

$$\frac{1,18 \times 10^{20}}{4,07 \times 10^{20}} = 29\%.$$

• Énergie finale consommée par le secteur de l'agriculture $E_{\text{Agriculture}}$:

Conversion en joules :

$$E_{\text{Agriculture}} = 194 \times 10^6 \times 4,1868 \times 10^{10} = 8,12 \times 10^{18} \text{ J.}$$

Part de l'agriculture dans la consommation d'énergie finale :

$$\frac{8,12 \times 10^{18}}{4,07 \times 10^{20}} = 2\%.$$

L'énergie finale est utilisée à parts comparables par le secteur industriel, l'habitat et les transports, et dans une bien moindre mesure par le secteur agricole.

p. 82 ■ **ACTIVITÉ 2**

Les carburants

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

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

Savoir-faire : « 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). »

Le **document 1** présente les principaux carburants fossiles.

Le **document 2** aborde la combustion de certains combustibles qui sont les composants majoritaires de carburants fossiles présentés dans le document 1. Ces combustions sont modélisées par des réactions dont l'équation est donnée ; l'énergie libérée par la combustion d'un gramme de combustible est donnée pour chacun.

Le **document 3** présente les biocarburants et leur intérêt, et fait le lien avec les dénominations des carburants que les élèves peuvent voir dans les stations services.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. • Méthane :

On calcule la masse d'une molécule de méthane :

$$m_{\text{CH}_4} = m_{\text{C}} + 4 \times m_{\text{H}}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 1,99 \times 10^{-23} + 4 \times 1,67 \times 10^{-24}$$

$$m_{\text{CH}_4} = 2,66 \times 10^{-23} \text{ g.}$$

1,00 g de méthane contient donc :

$$\frac{1,00}{2,66 \times 10^{-23}} = 3,76 \times 10^{22} \text{ molécules.}$$

L'équation de la combustion du méthane indique qu'une molécule de dioxyde de carbone est produite pour une molécule de méthane consommée. La combustion d'un gramme de méthane produira donc $3,76 \times 10^{22}$ molécules de dioxyde de carbone, soit une masse de dioxyde de carbone :

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 3,76 \times 10^{22} \times (M_{\text{C}} + 2 \times M_{\text{O}})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 3,76 \times 10^{22} \times (1,99 \times 10^{-23} + 2 \times 2,66 \times 10^{-23})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 2,75 \text{ g.}$$

• Octane :

On calcule la masse d'une molécule d'octane :

$$m_{\text{C}_8\text{H}_{18}} = 8 \times m_{\text{C}} + 18 \times m_{\text{H}}$$

$$m_{\text{C}_8\text{H}_{18}} = 8 \times 1,99 \times 10^{-23} + 18 \times 1,67 \times 10^{-24}$$

$$m_{\text{C}_8\text{H}_{18}} = 1,89 \times 10^{-22} \text{ g.}$$

1,00 g d'octane contient donc :

$$\frac{1,00}{1,89 \times 10^{-22}} = 5,29 \times 10^{21} \text{ molécules.}$$

L'équation de la combustion de l'octane indique que seize molécules de dioxyde de carbone sont produites pour deux molécules d'octane consommées, soit 8 fois plus. La combustion d'un gramme d'octane produira donc $8 \times 5,29 \times 10^{21} = 4,23 \times 10^{22}$ molécules de dioxyde de carbone, soit une masse de dioxyde de carbone :

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 4,23 \times 10^{22} \times (m_{\text{C}} + 2 \times m_{\text{O}})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 4,23 \times 10^{22} \times (1,99 \times 10^{-23} + 2 \times 2,66 \times 10^{-23})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 3,09 \text{ g.}$$

• **Dodécane :**

On calcule la masse d'une molécule de dodécane :

$$m_{C_{12}H_{26}} = 12 \times m_C + 26 \times m_H$$

$$m_{C_{12}H_{26}} = 12 \times 1,99 \times 10^{-23} + 26 \times 1,67 \times 10^{-24}$$

$$m_{C_{12}H_{26}} = 2,82 \times 10^{-22} \text{ g.}$$

1,00 g de dodécane contient donc :

$$\frac{1,00}{2,82 \times 10^{-22}} = 3,55 \times 10^{21} \text{ molécules.}$$

L'équation de la combustion du dodécane indique que vingt-quatre molécules de dioxyde de carbone sont produites pour deux molécules de dodécane consommées, soit 12 fois plus. La combustion d'un gramme de dodécane produira donc $12 \times 3,55 \times 10^{21} = 4,26 \times 10^{22}$ molécules de dioxyde de carbone, soit une masse de dioxyde de carbone :

$$m_{CO_2 \text{ produit}} = 4,26 \times 10^{22} \times (m_C + 2 \times m_O)$$

$$m_{CO_2 \text{ produit}} = 4,26 \times 10^{22} \times (1,99 \times 10^{-23} + 2 \times 2,66 \times 10^{-23})$$

$$m_{CO_2 \text{ produit}} = 3,11 \text{ g.}$$

2. • Méthane :

La combustion d'un gramme de méthane dégage une énergie égale à 50,0 kJ.

La masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie libérée est donc :

$$\frac{m_{CO_2}}{E_m} = \frac{2,75}{50,0 \times 10^3} = 5,50 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}.$$

Pour un térajoule libéré, c'est-à-dire $1,00 \times 10^{12}$ J libérés, la masse de CO_2 dégage est : $5,50 \times 10^{-5} \times 1,00 \times 10^{12} = 5,50 \times 10^7$ g, soit 55,0 tonnes de CO_2 par térajoule libéré.

• **Octane :**

La combustion d'un gramme d'octane dégage une énergie égale à 44,6 kJ.

La masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie libérée est donc :

$$\frac{m_{CO_2}}{E_m} = \frac{3,09}{44,6 \times 10^3} = 6,93 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$$

soit 69,3 tonnes de CO_2 par térajoule libéré.

• **Dodécane :**

La combustion d'un gramme de dodécane dégage une énergie égale à 44,1 kJ.

La masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie libérée est donc :

$$\frac{m_{CO_2}}{E_m} = \frac{3,11}{44,1 \times 10^3} = 7,05 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}$$

soit 70,5 tonnes de CO_2 par térajoule libéré.

3. L'octane et le dodécane produisent quasiment la même masse de dioxyde de carbone par unité d'énergie (environ 70 tonnes par térajoule). Le méthane, constituant très majoritaire du gaz

naturel, en produit moins par unité d'énergie (55 tonnes par térajoule). C'est donc le gaz naturel qui produit le moins de dioxyde de carbone par unité d'énergie dégagée.

Les biocarburants dégagent aussi du dioxyde de carbone lors de leur combustion, mais celui-ci est en partie compensé par le dioxyde de carbone absorbé par les végétaux utilisés pour les fabriquer. En incorporer aux carburants fossiles permet donc globalement de réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants fossiles purs.

p. 84 ■ **ACTIVITÉ 3**

Qualité de l'air et santé

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

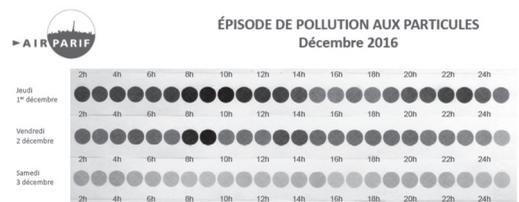
Savoirs : « La combustion de carburants fossiles et de biomasse libère du dioxyde de carbone et également des aérosols et d'autres substances (N_2O , O_3 , suies, produits soufrés), qui affectent la qualité de l'air respiré et la santé. »

Savoir-faire : « À partir de documents épidémiologiques, identifier et expliquer les conséquences sur la santé de certains polluants atmosphériques, telles les particules fines résultant de combustions. »

Les différents documents utilisés permettent de montrer comment les éléments nocifs produits lors de la combustion des carburants atteignent notre santé. Des projections permettent de montrer aussi l'incidence future de cette pollution.

Le **document 1** montre qu'en plus de produire du CO_2 à l'origine de l'effet de serre, l'utilisation des combustibles est à l'origine de l'émission dans l'atmosphère d'autres produits qui eux s'avèrent dangereux pour notre santé.

Pour compléter le document vous pouvez montrer un document visualisant un épisode de pollution aux particules (un document Airparif comme ci-dessous par exemple ; les teintes de gris reflètent l'intensité de la pollution).



Dans le **document 2**, on voit bien que les conséquences de la pollution atmosphérique sont importantes et peuvent provoquer un grand

nombre de pathologies qui seront accentuées chez les sujets les plus fragiles.

Dans le **document 3**, l'exemple proposé est ancien, mais il est extrêmement rare d'avoir des conditions comme celles étudiées : forte pollution, absence totale de pollution pendant une durée suffisamment longue (ici due à une grève), puis reprise de la pollution afin d'observer des conséquences mesurables au niveau de la santé.

Il peut être intéressant pour étoffer cet exemple de se procurer des mesures de pollution réalisées durant la période de confinement liée à la pandémie due au coronavirus COVID-19. À mettre en parallèle, par exemple, avec des statistiques sur le nombre d'admissions de jeunes enfants en hôpital pour pneumopathie ou toute autre maladie liées à la pollution citée dans le document 2 avant, pendant et après la période de confinement.

Dans le **document 4**, ces projections permettent de montrer les conséquences de la pollution sur la population notamment urbaine. En effet, au niveau des zones les plus polluées, la mortalité pourrait baisser de quasiment 20 % et l'espérance de vie pourrait augmenter de 4,5 années.

► Exemple de correction des pistes de travail

1.

Particules fines	Protoxyde d'azote (N ₂ O)	Ozone (O ₃)	Produits soufrés
Affectent le système respiratoire (inflammation des alvéoles, cancer des poumons) et cardiovasculaire (infarctus, accident vasculaire cérébral, etc.).	Engendre une hyperactivité bronchique. Il augmente la fréquence et l'intensité des crises d'asthme et peut favoriser certaines affections pulmonaires chez l'enfant.	Engendre une inflammation et une hyper-réactivité bronchique pouvant entraîner crise d'asthme et encombrement bronchique.	À l'origine de nombreuses pathologies respiratoires : constriction des bronches surtout néfaste dans l'asthme ou la bronchite chronique. Irritations oculaires.

2. Dans le document 3, on observe une claire corrélation entre la concentration en PM10 qui sont des particules fines et l'évolution des pathologies respiratoires (bronchites, asthme, pneumonies, pleurésies). Suite à l'arrêt de la production durant la grève, on observe une nette chute des PM10 (on passe de 90 à 50 µg/m³) et en parallèle les admissions à l'hôpital diminuent elles aussi (on passe de 80 à 20 pour les bronchites et l'asthme). Suite à la reprise de l'activité en 1987/1988, la pollution

augmente à nouveau, ce qui entraîne un retour aux valeurs d'avant la grève des pneumopathies.

Cet exemple montre bien que plus les polluants atmosphériques tels que les particules fines sont abondants dans l'atmosphère, plus la santé des personnes en contact avec eux est en danger.

3. On observe sur les cartes que pour la ville de Lyon il y aurait une baisse de l'ordre de 15 à 20,5 % de la mortalité et une augmentation de l'espérance de vie de 18 à 36 mois pour une personne de 30 ans.

4. Ces conséquences s'expliquent par le fait qu'une forte diminution de la pollution de l'atmosphère aux particules fines entraînera une diminution des problèmes respiratoires, des cancers des poumons et des maladies cardiovasculaires. On aura donc une diminution des décès dus à ces maladies, et leur moindre fréquence allongera donc l'espérance de vie.

p. 86 | **ACTIVITÉ 4**

Les émissions de dioxyde de carbone

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. »

Savoir-faire : « 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. »

Le **document 1** définit l'empreinte carbone d'une activité ou d'une personne.

Dans le **document 2**, on compare l'empreinte carbone pour différents modes de transports de voyageurs, en tenant compte de la distance parcourue, et en introduisant le concept d'efficacité énergétique que les élèves peuvent approfondir à l'aide de l'animation.

Le **document 3** permet de comparer les émissions de CO₂ de la voiture thermique et de la voiture électrique :

– sur l'ensemble de leur cycle de vie, en montrant notamment l'importance de la fabrication de la batterie d'une voiture électrique dans les émissions de CO₂ ;

– en fonction du pays d'utilisation, en mettant en évidence l'importance du mix énergétique du pays d'utilisation de la voiture électrique.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. C'est le secteur des transports qui a l'empreinte carbone la plus importante en France d'après le document 1. Sa part dans l'empreinte carbone de la France est :

$$\frac{127}{39 + 70 + 1 + 69 + 10 + 127} = \frac{127}{316} = 40 \%$$

2. La fabrication de la batterie et celle de la voiture électrique sont identiques d'un pays à l'autre. C'est la partie du puits au réservoir qui diffère d'un pays à l'autre selon le mode de production de l'électricité. L'empreinte carbone sur le cycle de vie d'une voiture dans un pays comme la Norvège qui produit de l'électricité sans empreinte carbone est bien plus faible que dans un pays comme l'Allemagne qui utilise notamment des centrales à charbon pour produire de l'électricité.

3. On compare la part de chacun des modes de transport de voyageurs dans les émissions de dioxyde de carbone et l'activité :

- Le transport aérien émet environ 3 % des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des transports de personnes en France. Or, celles-ci ne concernent qu'un peu plus de 1 % de l'activité, c'est-à-dire que seulement un peu plus de 1 % des kilomètres parcourus en France pour transporter des personnes sont effectués par transport aérien.
- Les voitures particulières et les deux roues motorisées émettent plus de 92 % des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des transports de personnes en France. Or, celles-ci ne concernent qu'environ 78 % de l'activité.
- Les autocars interurbains (2 % de l'empreinte carbone et environ 5 % de l'activité) et les transports collectifs urbains (moins de 2 % de l'empreinte carbone et environ 5 % de l'activité) sont comparables.
- Enfin, le transport ferroviaire de personnes représente moins de 1 % de l'empreinte carbone mais quasiment 10 % de l'activité, il s'agit du mode de transport de personnes à privilégier. Viennent ensuite les autocars interurbains et les transports collectifs urbains. Les transports aériens sont à éviter, et dans une moindre mesure les voitures particulières et les deux-roues. L'animation du document 2 permet de comprendre aussi que l'efficacité du mode de transports est liée au nombre de personnes à transporter.

4. Pour minimiser son empreinte carbone, on peut par exemple marcher ou faire du vélo pour se déplacer, ou utiliser les transports ferroviaires et les transports en commun urbains, plutôt que les transports aériens ou la voiture. Si l'utilisation de la voiture est indispensable, on peut utiliser une voiture électrique qui permet d'émettre moins de CO₂ qu'une voiture thermique, en France et sur son cycle de vie. On peut aussi limiter sa consommation énergétique, comme l'animation du document 1 permet de le voir, en limitant le chauffage et en éteignant l'éclairage dès que possible.

p. 88 ■ **ACTIVITÉ 5**

Vers une transition écologique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Les scénarios de transition écologique font différentes hypothèses sur la quantité de GES émise dans le futur. Ils évaluent les changements prévisibles, affectant les écosystèmes et les conditions de vie des êtres humains, principalement les plus fragiles.

Les projections fournies par les modèles permettent de définir les aléas et peuvent orienter les prises de décision. Les mesures d'adaptation découlent d'une analyse des risques et des options pour y faire face. »

Savoir-faire : « Analyser l'impact de l'augmentation du CO₂ sur le développement de la végétation.

Analyser des extraits de documents du GIEC ou d'accords internationaux proposant différents scénarios. »

Les différents documents utilisés permettent de montrer et d'évaluer, à partir de l'étude d'événements passés et de projections pour certains paramètres, les effets sur les écosystèmes, et de faire des projections sur l'avenir.

Le **document 1** montre que l'étude d'événements passés, ici le PETM (Paléocène-Éocène thermal maximum), permet de faire des analogies avec le présent, en comparant des données, ici l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique et ses conséquences sur la température à la surface de la Terre. On peut ainsi, en comparant les chiffres, estimer dans combien de temps le taux de CO₂ atteindra celui du PETM.

Le **document 2** montre que l'analyse d'un réchauffement climatique passé permet aussi de connaître ses conséquences sur les écosystèmes.

Elle donne un argument scientifique qui repose sur des faits concrets et non des suppositions.

Le **document 3** montre que la consommation de CO_2 par les plantes lors de la photosynthèse augmente en fonction de la teneur en CO_2 de l'atmosphère car les végétaux s'adaptent à cette modification en augmentant leur surface foliaire. On pourrait donc penser que l'augmentation du CO_2 atmosphérique pourrait être compensée par les plantes. Cependant, des stress peuvent ralentir la croissance des végétaux, et la déforestation l'impact de cette compensation.

Le **document 4** présente plusieurs scénarios. Ils concernent :

- l'évolution probable de la biomasse marine en fonction de la température ;
- l'évolution du niveau de la mer suite à la fonte des glaces.

D'autres scénarios sont proposés sur des sites institutionnels, tel que celui du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC).

► Exemple de correction des pistes de travail

1. L'absence de contrôle de l'augmentation de la libération de CO_2 dans l'atmosphère entraînera une augmentation importante de l'effet de serre, et donc de la température moyenne à la surface de la planète, comme a pu le montrer l'étude de l'évènement PETM. À cette époque, la brusque libération d'énormes quantités de CO_2 a fait augmenter la température de 7°C et on sait qu'actuellement la vitesse de rejet du CO_2 est dix fois supérieure à cette période (document 1).

Ce changement va perturber des écosystèmes en entraînant la disparition de nombreuses espèces et en provoquant la migration d'autres : « Les chercheurs pensent que les pôles étaient libres de glace et que l'Arctique abritait palmiers et crocodiles. » (document 2).

Il a été démontré que les végétaux s'adaptent à cette augmentation du CO_2 atmosphérique en augmentant la surface de leur feuille. On peut donc penser que cette adaptation va la compenser mais c'est sans compter sur les stress que les évènements climatiques violents risquent de provoquer sur la croissance des plantes (document 3).

2. D'après le document 4, le réchauffement climatique entraînerait :

- une forte augmentation du niveau des mers suite à la fonte des glaces : de nombreuses régions de bord de mer se retrouveraient alors

immergées, ce qui entraînerait la disparition de nombreuses villes côtières, souvent très peuplées. Des migrations de population vers les terres encore immergées risqueraient de déclencher des surpeuplements et des conflits ;

- une diminution de la biomasse marine : tous les métiers liés à la pêche seraient alors fortement impactés car les prises risqueraient d'être moins nombreuses.

3. La transition écologique correspond au « passage vers un modèle de production et de consommation répondant aux enjeux suivants : le changement climatique, la rareté des ressources, la diminution de la biodiversité et l'augmentation des risques sanitaires et environnementaux. »

Il va donc falloir passer à un modèle permettant de diminuer, par exemple :

- la production de CO_2 et de tous les gaz à effet de serre en développant au maximum les énergies propres au dépend de l'utilisation des énergies fossiles et du nucléaire ;
- la consommation de matières première non renouvelable en les recyclant d'avantage mais surtout en diminuant fortement leur consommation, en développant par exemple une agriculture plus raisonnée ;
- la disparition des écosystèmes et des espèces les peuplant en augmentant les zones protégées, en stoppant la déforestation, la pollution des sols...

CORRECTION DES EXERCICES

p. 93 ■

Vérifier ses connaissances

1 Questions à choix multiple

A- 2 ; la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car 1 MW équivaut à 10^6 W ; la proposition 3 n'est pas une bonne réponse car 100 mW équivaut à $1,00 \times 10^{-1}$ W.

B- 2 et 3 ; la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car l'énergie peut être exprimée en kWh et non en $\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$.

C- 2 ; la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car l'énergie utilisée dans le monde ne provient pas principalement de l'uranium (utilisé dans les centrales nucléaires) ; la proposition 3 n'est pas une bonne réponse car l'énergie utilisée dans le monde ne provient pas principalement des énergies renouvelables (éolienne, géothermique, solaire, etc.).

D- 1 et 3 ; la proposition 2 n'est pas une bonne réponse car le troisième principal secteur n'est pas le secteur agricole mais le secteur de l'habitat.

2 Retour sur les problématiques

1. • Quelles sont les ressources d'où provient l'énergie consommée dans le monde ?

L'énergie consommée dans le monde provient d'une diversité de ressources disponibles sous forme :

- de stocks : combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) et uranium ;
- de flux (flux radiatif solaire, flux géothermique, puissance gravitationnelle).

À l'heure actuelle, les combustibles fossiles représentent la plus grande partie de ces ressources.

• Comment les modes de consommation de l'énergie affectent-ils la nature et la santé ?

Ces combustibles fossiles et la biomasse contiennent de l'énergie que l'on convertit lors de combustions. Ces transformations chimiques libèrent du dioxyde de carbone, principal gaz à effet de serre qui accentue le réchauffement climatique. Sont aussi produits d'autres espèces chimiques (protoxyde d'azote, produits soufrés) et aérosols dont des particules fines. Ces dernières, de moins de $2,5\ \mu\text{m}$ de diamètre, pénètrent en profondeur dans les poumons et provoquent à court terme des affections respiratoires et cardio-vasculaires et à plus long terme des cancers.

• Comment sont prises les décisions qui peuvent limiter leur impact sur les écosystèmes et les conditions de vie des êtres humains ?

Les décisions et donc les mesures que cela implique au niveau des états sont prises suite à l'analyse des projections, des scénarios établis par des organismes officiels tels que le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, qui regroupe actuellement 195 pays membres de l'ONU). Celui-ci définit des profils d'évolution des concentrations en GES dans l'avenir. À partir de ces derniers, des simulations climatiques sont élaborées. Elles évaluent les changements prévisibles, affectant les écosystèmes et les conditions de vie des êtres humains, principalement les plus fragiles. Les projections fournies par les modèles permettent de définir les aléas et peuvent orienter les prises de décision. Les mesures d'adaptation découlent d'une analyse des risques et des options pour y faire face. Toutefois, ces décisions qui devraient permettre d'aller vers une transition écologique sont souvent contestées pour des raisons économiques ou politiques.

3 Restituer le cours

1. 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.

2. L'uranium et les combustibles fossiles sont deux ressources d'énergie primaire disponibles sous forme de stock. Le flux radiatif solaire et le flux géothermique sont deux ressources d'énergie primaire disponibles sous forme de flux.

3. a. et b. La combustion de carburants fossiles ou de biomasse produit du dioxyde de carbone qui contribue à l'effet de serre et donc au réchauffement climatique. D'autres espèces peuvent être produites, comme du protoxyde d'azote, des produits soufrés et des aérosols, dont des particules fines, responsables d'affections respiratoires et cardio-vasculaires et de cancers.

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

4 Émissions liées aux énergies fossiles

1. La combustion des combustibles fossiles rejette du dioxyde de carbone.

2. Les émissions liées aux énergies fossiles augmentent de 1980 jusqu'en 2017 car la consommation mondiale d'énergie croît régulièrement (doublement dans les 40 dernières années) et parce que ce sont les combustibles fossiles qui dominent les ressources d'énergie.

3. Si ces émissions suivaient le profil RCP 8,5, le réchauffement climatique s'accroîtrait par augmentation de l'effet de serre. De plus, on peut penser que les combustions seraient encore très utilisées et affecteraient la qualité de l'air et la santé (particules fines notamment).

4. On peut réduire les émissions de dioxyde de carbone en choisissant des activités ou des moyens de transports dont l'empreinte carbone est faible, par exemple en optant pour des trajets à vélo. On peut aussi choisir un mode de chauffage qui n'utilise pas de combustion, comme par exemple la géothermie.

p. 94 ■

Exercice similaire

6 Dioxyde de carbone produit par la combustion du butane

1. On calcule la masse d'une molécule de butane :

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4 \times m_{\text{C}} + 10 \times m_{\text{H}}$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4 \times 1,99 \times 10^{-23} + 10 \times 1,67 \times 10^{-24}$$

$$m_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 9,63 \times 10^{-23} \text{ g.}$$

1,00 g de butane contient donc :

$$\frac{1,00}{9,63 \times 10^{-23}} = 1,04 \times 10^{22} \text{ molécules.}$$

2. L'équation de la combustion du butane indique que huit moles de dioxyde de carbone sont produites pour quatre moles de butane consommées, soit 4 fois plus. La combustion d'un gramme de butane produit donc $4 \times 1,04 \times 10^{22} = 4,16 \times 10^{22}$ molécules de dioxyde de carbone, soit une masse de dioxyde de carbone :

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 4,16 \times 10^{22} \times (m_C + 2 \times m_O)$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 4,16 \times 10^{22} \times (1,99 \times 10^{-23} + 2 \times 2,66 \times 10^{-23})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 3,04 \text{ g.}$$

3. La combustion d'un gramme de butane dégage une énergie égale à 45,4 kJ. La masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie libérée est donc :

$$\frac{m_{\text{CO}_2}}{E_m} = \frac{3,04}{45,4 \times 10^3} = 6,70 \times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{J}^{-1}.$$

p. 95 ■

S'entraîner

7 L'empreinte carbone de l'alimentation

1. L'empreinte carbone de l'alimentation d'un individu est la masse de dioxyde de carbone CO_2 produite directement ou indirectement par sa consommation d'énergie et/ou de matière première liées à son alimentation.

2. Pour un plat donné, on peut réduire son empreinte carbone :

- en utilisant des produits non transformés (ce qui permet de réduire l'empreinte carbone liée aux transformations qu'effectue l'industrie agroalimentaire) ;
- en utilisant des produits locaux, et en minimisant ainsi l'empreinte carbone des transports.

3. De manière générale, on peut minimiser son empreinte carbone :

- en consommant des fruits et légumes de saison ;
- en consommant de manière mesurée des produits issus d'animaux ruminants.

8 Effet de l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique sur la végétation

Les documents montrent que les émissions de dioxyde de carbone ont globalement augmenté de 1982 à 2015, alors que la surface foliaire a elle aussi globalement augmenté dans le monde sur la même période. Les plantes consomment du

CO_2 pour réaliser la photosynthèse. Plus il y a de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, plus les plantes en consomment et plus leur développement est important. La végétation s'efforce donc de ralentir les effets des changements climatiques causés par l'Homme.

9 Impact environnemental de cafetières

1. Globalement, la cafetière expresso permet de minimiser les émissions de GES :

- de $\frac{65 - 40}{65} = 38\%$ par rapport à la machine à capsules ;

- de $\frac{44 - 40}{44} = 9\%$ par rapport à la cafetière à filtre.

2. C'est l'emballage qui entraîne le plus gros écart d'émissions de GES selon le type de cafetière. Les émissions dues à l'emballage sont environ 15 fois plus grandes pour les cafetières à capsules que pour les cafetières expresso ou à filtre. Le café moulu utilisé dans les cafetières à filtre et les machines expresso est souvent emballé en paquet de 250 g alors qu'il faut environ 50 capsules pour contenir 250 g de café. De plus, les capsules sont elles-mêmes conditionnées en petit carton de 10. La fabrication et le transport de ces emballages supplémentaires expliquent les écarts d'émissions de GES.

Les émissions dues à la consommation d'électricité est plus grande pour la cafetière filtre car on peut penser qu'elle nécessite de chauffer l'eau plus longtemps (le temps que l'eau du réservoir passe à travers le café contenu dans le filtre). De plus, le récipient en verre dans lequel coule le café doit être lavé tous les jours avec de l'eau souvent chauffée par un chauffe-eau électrique alors que dans le cas de machine expresso ou à capsules, le café coule directement dans la tasse.

10 L'énergie géothermique

1. L'énergie géothermique est disponible sous forme de flux.

2. L'électricité géothermique produite à Larderello chaque année est 4 800 GWh, soit :

$$4\,800 \times 10^6 \times 3,60 \times 10^6 = 1,73 \times 10^{16} \text{ J.}$$

Or 1 TEP, c'est-à-dire $4,1868 \times 10^{10} \text{ J}$ d'énergie produite par géothermie correspond à l'émission d'environ 1 419 kg de CO_2 donc :

$$4,18 \times 10^{10} \text{ J} \rightarrow 1\,419 \text{ kg de CO}_2$$

$$1,73 \times 10^{16} \text{ J} \rightarrow ?$$

$$? = \frac{1\,419 \times 1,73 \times 10^{16}}{4,18 \times 10^{10}} = 5,87 \times 10^8 \text{ kg,}$$

soit 587 milles tonnes

La masse de dioxyde de carbone émise pour produire l'électricité géothermique à Larderello chaque année est 587 milles tonnes.

3. a. Pour produire la même quantité d'énergie, une centrale à charbon émet environ 8 fois plus de dioxyde de carbone qu'une centrale géothermique, soit $8 \times 587 \times 10^6 \text{ kg} = 4,70 \times 10^9 \text{ kg}$.

b. L'utilisation de centrale géothermique permet donc d'économiser :

$4,70 \times 10^9 - 5,87 \times 10^8 = 4,11 \times 10^9 \text{ kg}$, c'est-à-dire 4,11 millions de tonnes de dioxyde de carbone.

11 Effets des particules fines sur la santé en Île-de-France

Les particules fines PM_{2,5} sont des particules de moins de 2,5 µm de diamètre en suspension dans l'air. Elles pénètrent en profondeur dans les voies respiratoires et poumons, ce qui explique que le nombre d'appels à SOS médecins pour symptômes respiratoires augmente lorsque la concentration en particules fines PM_{2,5} augmente.

Plus leur concentration dans l'atmosphère est grande, plus les risques et dégâts causés sont importants : lorsque la concentration en particules fines PM_{2,5} augmente de 10 µg·m⁻³, le risque de mortalité pour des causes respiratoires augmente de 1,1 % et celui pour causes cardiovasculaires de 0,5 % environ.

12 Prépa BAC L'électricité en Bretagne

1. a. et b. Les ressources d'énergie primaire citée dans ce texte sont :

- le charbon, combustible fossile disponible sous forme de stock ;
- l'uranium dans les réacteurs nucléaires de Flamanville, disponible sous forme de stock ;

– le fioul dérivé du pétrole, combustible fossile disponible sous forme de stock ;

– le barrage de la Rance (usine marémotrice), disponible sous forme de flux ;

– l'éolien, vent disponible sous forme de flux.

2. Les combustions du charbon dans la centrale à charbon de Cordemais et de fioul dans les turbines à combustion entraînent des émissions :

– de dioxyde de carbone et autres GES qui provoquent et accélèrent le réchauffement climatique ;

– des aérosols dont des particules fines qui provoquent des affections respiratoires et cardiovasculaires et des cancers à long terme.

3. La centrale marémotrice de la Rance contient 24 alternateurs de 10 MW chacun, la puissance totale est donc :

$$P_{\text{centrale marémotrice}} = 10 \times 24,0 = 240 \text{ MW.}$$

$$\frac{P_{\text{centrale marémotrice}}}{P_{\text{centrale éolienne}}} = \frac{240 \times 10^6}{6\,000 \times 10^3} = 40.$$

La puissance de la centrale marémotrice de la Rance est 40 fois plus grande que celle de la centrale éolienne de Goulien.

$$\frac{P_{\text{réacteur nucléaire}}}{P_{\text{centrale marémotrice}}} = \frac{1\,300\,000 \times 10^3}{240 \times 10^6} = 5,4.$$

La puissance d'un réacteur nucléaire de Flamanville est 5,4 fois plus grande que celle de la centrale marémotrice de la Rance.

4. La consommation électrique annuelle de la ville de Rennes est :

$$E_{\text{Rennes}} = 220\,000 \times 2,4 \times 10^3 = 5,3 \times 10^8 \text{ kWh,}$$

soit en J :

$$5,3 \times 10^8 \times 3,6 \times 10^6 = 1,9 \times 10^{15} \text{ J.}$$

D'après le document 2, la centrale marémotrice de la Rance produit chaque année $2,0 \times 10^{15} \text{ J}$ d'électricité, donc elle peut alimenter en électricité la ville de Rennes.

Vers l'évaluation commune

Manuel p. 99-104

CORRECTION DES EXERCICES

2 Un climat bien différent au Crétacé

1. Actuellement la majorité des continents se situent dans l'hémisphère Nord (environ les 2/3) alors qu'au Crétacé leur répartition était plus équilibrée entre les deux hémisphères. Par ailleurs, la superficie des continents au Crétacé était moindre, elle atteignait seulement 16 % de la surface planétaire alors qu'elle est de 27 % de nos jours.

2. Au Crétacé, le taux de CO_2 atmosphérique était environ 5 fois plus élevé que l'actuel et la température plus importante. Ceci est confirmé par l'absence totale de glace au Crétacé.

3. Le CO_2 est un gaz à effet de serre (GES) donc plus l'atmosphère est riche en ce gaz, plus la température moyenne est élevée.

4. Au Crétacé, la surface des fonds océaniques formée par une activité sous-marine volcanique était un peu moins du double de ce qu'elle est actuellement, $4,8 \text{ km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ au lieu de $2,8 \text{ km}^2 \cdot \text{an}^{-1}$, ce qui traduit un volcanisme très important à l'époque. Comme le volcanisme émet beaucoup de CO_2 (57,09 % des gaz totaux), ce gaz était libéré en grande quantité dans les eaux océaniques, puis gagnait l'atmosphère.

5. On peut formuler l'hypothèse que le climat chaud du Crétacé est lié à un effet de serre important exercé par un taux élevé de CO_2 dans l'atmosphère, lui-même dû à un dégazage important au niveau des dorsales océaniques.

6. Une température moyenne plus élevée a provoqué un réchauffement des eaux océaniques. Ce réchauffement fut à l'origine d'une dilatation thermique des eaux océaniques d'où une augmentation de leur volume ainsi que d'une fonte totale des glaciers continentaux (calottes, montagnes). Ainsi, le volume des eaux océaniques augmentait. De ce fait, le niveau marin moyen était plus élevé et les océans crétacés recouvraient plus les continents.

Remarque : sur le long terme, l'effet de la fonte des glaces continentales est nettement prépondérant sur la dilatation thermique. Des modifications du fond des océans liées à l'activité importante des dorsales sont aussi à prendre en compte (non exigible).

3 Réchauffement climatique et incendies de forêts

Note des auteurs : le document 1 présente les surfaces forestières incendiées dans d'autres contextes que celui de l'exploitation agricole très répandu en Amérique du Sud et en Afrique. Il s'agit donc d'incendies naturels ou causés par l'Homme (accidentellement ou volontairement) sans objectifs économiques associés.

► Partie 1. Comprendre les liens entre cycle du carbone et incendies de forêt

1. La surface forestière moyenne perdue chaque année est de 4,46 millions d'hectares.

Calcul : $(2,16 + 4,16 + 3,85 + 5,05 + 3,51 + 3,80 + 3,47 + 3,90 + 2,50 + 3,14 + 3,42 + 6,09 + 6,54 + 5,76 + 4,44 + 5,71 + 6,40 + 6,38) / 18 = 4,46$.

2. On peut calculer les émissions de carbone sous forme de CO_2 dues à ces incendies de la façon suivante :

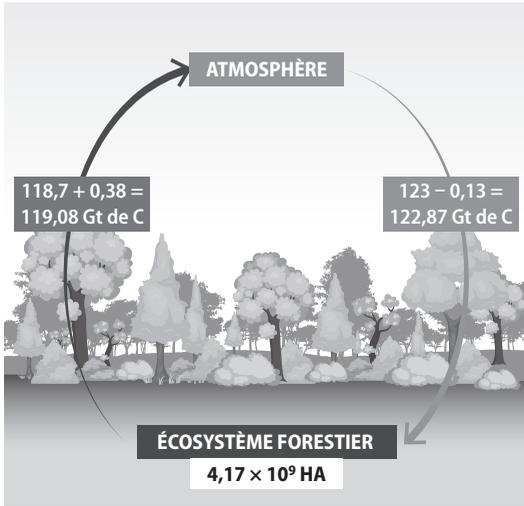
Émissions de C = $(0,42 \times 4,46 \times 120) + (0,25 \times 4,46 \times 64,20) + (0,33 \times 4,46 \times 64,20)$
 $= 224,78 + 63,22 + 94,49$
 $= 382,49$ millions de tonnes soit environ 0,38 Gt de C.

3. D'après le document 3, chaque année, les 4,17 milliards d'ha de forêts piègent 123 milliards de tonnes de C soit pour 1 ha, en moyenne :

$\frac{123}{4,17} = 29,5$ tonnes de carbone.

4. En tenant compte des émissions liées aux incendies et de la baisse de la diminution du piégeage par les forêts disparues que l'on peut évaluer à : $29,50 \times 4,46 = 131,57$ millions de tonnes de carbone soit

0,13 Gt de C environ, on peut modifier le schéma ainsi :



On voit donc que la quantité de C atmosphérique augmente annuellement de 0,38 Gt du fait des incendies (soit 3,80 Gt en 10 ans) et ne diminue pas de 0,13 Gt. Au final, on aura une augmentation en partie relative de la quantité de C de 0,51 Gt dans l'atmosphère.

Partie 2. Une boucle de rétroaction positive

5. Les conséquences climatiques d'un incendie de forêt s'inscrivent sur le long terme car :

- On voit qu'il faut 30 ans pour qu'une forêt commence à se régénérer après l'incendie, ce qui signifie que la quantité de carbone (C) qui ne serait plus piégée par cette forêt serait, au pire, de $30 \times 0,13 = 3,90$ Gt de C sur cette période. Ainsi, la perte annuelle de surface forestière par incendies entraîne sur 30 ans une augmentation, en partie relative, de $0,38 + 3,90 = 4,28$ Gt de C.

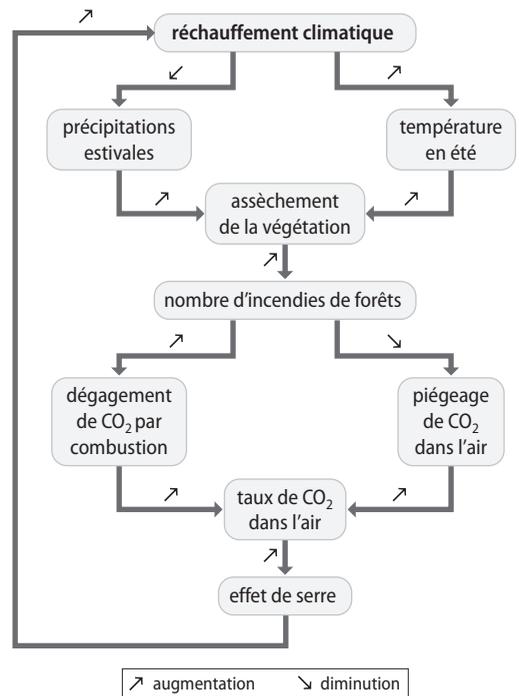
- Cette longue résilience s'explique par l'érosion subie par le sol du fait de la perte de couvert végétal.

- Enfin, le sol contient de l'humus, c'est-à-dire de la matière organique riche en carbone, qui pourra à son tour être à l'origine d'émissions supplémentaires du fait de sa dégradation.

6. On voit que la courbe de l'indice IFM est globalement très proche de celle du nombre annuel de feux, ce qui signifie qu'il est fiable. On constate en effet qu'une augmentation ou qu'une diminution de l'indice est toujours respectivement corrélée à une augmentation ou à une diminution du nombre de feux.

Remarque : il ne faut pas ici commettre l'erreur de comparer les valeurs absolues des deux tracés car l'IFM ne correspond pas un nombre de feux mais à un degré de risque de déclenchement d'incendie.

7. On observe que d'ici la période 2051-2070, l'indice IFM sera supérieur à 14 (signifiant un risque d'incendie très élevé) d'un jour sur quatre à un jour sur deux de mi-mai à mi-octobre sur l'essentiel du territoire français alors qu'aujourd'hui, ce risque est essentiellement concentré dans le sud-est de la France et en Corse. Or, on sait que, d'ici cette période, le réchauffement climatique aura modifié de nombreux paramètres climatiques en France comme la température en hausse ou l'importance des précipitations qui diminueront. On peut donc penser que ces facteurs augmentent le risque d'incendie comme le traduit l'IFM. Or, les incendies de forêts conduisent à une augmentation de la quantité de C dans l'air, sous forme de CO_2 , qui est un gaz à effet de serre en partie responsable du réchauffement. On voit donc que les incendies de forêts constituent un exemple de rétroaction positive comme l'illustre le schéma ci-dessous :



4 « Optimum climatique médiéval » et réchauffement actuel sont-ils équivalents ?

► Partie 1. Mise en évidence de l'optimum climatique médiéval

1. On observe que le mélèze qui a poussé dans un climat froid a 277 ans et mesure 13 cm de diamètre, soit des cernes de moins d'un quart de millimètre ($(13 : 2)/277 = 0,023$ cm). Il convient de diviser le rayon de l'arbre et non pas le diamètre car sinon chaque cerne est compté deux fois. Le sapin de Douglas, de même diamètre, mais âgé de 10 ans, possède donc des cernes d'épaisseur moyenne de 0,6 cm. Or, il a poussé dans un climat tempéré. On peut donc penser que plus la température est élevée, plus l'épaisseur du cerne formé est importante.

Remarque : avec toutefois la réserve qu'il s'agit de deux espèces différentes dont les vitesses de croissance, dans les mêmes conditions, pourraient être différentes.

2. On constate que les cernes formés entre 900 et 1300, soit en 400 ans, ont une épaisseur environ trois fois plus importantes que ceux formés après 1300 jusqu'à 1900, soit en 600 ans. On peut donc supposer que la période 1300-1900 fut globalement moins chaude que la précédente. La période 900-1300 ans correspond approximativement à la période de l'« optimum climatique médiéval » situé entre 950 et 1250.

3. Le réchauffement entre 950 et 1240 est d'environ $+0,4$ °C, c'est-à-dire de $-0,25$ °C à $+0,15$ °C. Entre 1900 et 2000, les écarts de température sont passés de $-0,35$ °C à $+0,9$ °C, soit une hausse de $1,25$ °C, ce qui est plus de trois fois supérieur au réchauffement de l'« optimum climatique médiéval ».

4. La vitesse d'augmentation de la température lors de l'« optimum climatique médiéval » a été de $\frac{0,4}{90}$ ans = $0,0045$ °C·an⁻¹ et celle du réchauffement

actuel de $\frac{1,25}{100}$ = $0,0125$ °C·an⁻¹. La vitesse du

réchauffement actuel est donc $\frac{0,0125}{0,0045}$ = 2,7 fois

plus importante que celle de l'« optimum climatique médiéval ».

► Partie 2. Des différences entre l'optimum climatique médiéval et le réchauffement actuel

5. L'« optimum climatique médiéval » a seulement été constaté dans certaines régions de l'hémisphère Nord alors que le réchauffement actuel concerne toute la planète (document 3). De plus entre 950 et 1250, la température moyenne de l'été

météorologique (de juin à août inclus) en Asie était inférieure à celle de l'Europe (la plupart du temps) et en baisse de 1000 à 1150 environ. Il existe donc des différences à la fois dans le temps et l'espace entre les tendances locales et l'« optimum climatique médiéval ».

6. La mesure du taux de CO₂ dans l'atmosphère emprisonnée dans les glaces polaires prouve que sa concentration était constante entre 950 et 1250 : 280 ppm. Une augmentation du taux de CO₂ accentuant l'effet de serre n'est donc pas une hypothèse envisageable. De 950 à 1050, la puissance solaire a diminué, puis augmenté entre 1050 et 1100 et est restée élevée jusqu'à l'an 1250. Excepté pour les 100 premières années de l'« optimum climatique médiéval », l'hypothèse d'un réchauffement dû à un accroissement de l'activité solaire est concevable.

7. Si le réchauffement actuel était dû à un accroissement de l'activité solaire, l'écart de température enregistré entre 1900 et 2000 serait de $0,565 \times (342,2125 - 342,05) = 0,09$ °C soit beaucoup moins que ce qui est constaté, $1,25$ °C. On observe aussi que de 1900 à 2000, le taux de CO₂ atmosphérique est passé d'environ 290 ppm à presque 390 ppm, ce qui peut accréditer l'hypothèse d'un réchauffement essentiellement dû à une accentuation de l'effet de serre.

8. Les « climatosceptiques » créent une infox en utilisant l'« optimum climatique médiéval » comme argument justifiant le réchauffement climatique actuel car :

- le réchauffement actuel est plus important, $+1,25$ °C au lieu de $0,4$ °C, et surtout beaucoup plus rapide, environ 3 fois plus ;
- le réchauffement actuel concerne l'ensemble de la planète ;
- le taux de CO₂ actuel n'a jamais été aussi élevé (plus de 415 ppm en 2020) et augmente sans cesse, alors qu'il était constant et bien inférieur (280 ppm) au cours de l'« optimum climatique médiéval » ;
- la puissance solaire actuelle n'explique pas l'augmentation de température enregistrée en 100 ans. Seul l'excès de CO₂ d'origine anthropique dans l'atmosphère le permet.

5 Consommation énergétique comparée

1. a. Calculons la masse d'une molécule de méthane :

$$m_{\text{CH}_4} = m_{\text{C}} + 4 \times m_{\text{H}} = 1,99 \cdot 10^{-23} + 4 \times 1,67 \cdot 10^{-24} = 2,66 \cdot 10^{-23} \text{ g.}$$

1,00 g de méthane contient donc $\frac{1,00}{2,66 \times 10^{-23}} = 3,76 \cdot 10^{22}$ molécules.

L'équation de la combustion du méthane indique que deux moles de dioxyde de carbone sont produites pour une mole de méthane consommée, soit 2 fois plus. La combustion d'un gramme de méthane produit donc $2 \times 3,76 \cdot 10^{22} = 7,52 \cdot 10^{22}$ molécules de dioxyde de carbone, soit une masse de dioxyde de carbone :

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 7,52 \cdot 10^{22} \times (m_{\text{C}} + 2 \times m_{\text{O}}) = 7,52 \cdot 10^{22} \times (1,99 \cdot 10^{-23} + 2 \times 2,66 \cdot 10^{-23})$$

$$m_{\text{CO}_2 \text{ produit}} = 5,50 \text{ g}$$

b. La combustion d'un gramme de méthane dégage une énergie $E = 56 \text{ kJ}$. La masse de dioxyde de carbone produite par unité d'énergie libérée est donc :

$$\frac{m_{\text{CO}_2}}{E} = \frac{5,50}{56 \cdot 10^3} = 9,82 \cdot 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{J}^{-1}.$$

2. a. Les ressources d'énergie primaire du Qatar sont les combustibles fossiles.

b. Ces ressources sont disponibles sous forme de stock.

c. Les combustibles fossiles sont brûlés pour produire de l'électricité. Or, les combustions d'hydrocarbures entraînent des émissions :

- de dioxyde de carbone et autres GES qui provoquent et accélèrent le réchauffement climatique.

- des substances comme les particules fines qui affectent la qualité de l'air et provoquent des problèmes de santé (des affections respiratoires et cardiovasculaires et des cancers à long terme).

3. a. La consommation d'énergie par habitant est très variable d'un pays à l'autre, comme le montre le graphique du doc. 1. Ainsi, les pays sont inégaux face à la consommation d'énergie : globalement les pays du Nord consomment bien plus d'énergie que ceux du Sud.

b. C'est en Afrique (principalement la ceinture sahélienne) que l'énergie consommée par habitant est la plus faible.

4. a. L'unité officielle de l'énergie est le joule (J), mais on peut utiliser d'autres unités comme la Tonne Equivalent Pétrole (TEP) à l'échelle de la consommation d'énergie d'un pays. Une TEP correspond à l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole brut.

b. L'Islande recourt massivement aux énergies renouvelables, comme la géothermie et l'énergie hydroélectrique. Rien de comparable au Qatar qui ne va pas dans le sens d'une transition écologique souhaitable pour la planète, en utilisant exclusivement des combustibles fossiles.

Deux siècles d'énergie électrique

LE PROGRAMME

2. Le futur des énergies

2.1 – Deux siècles d'énergie électrique

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.

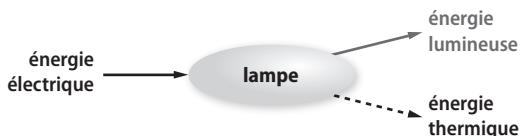
Savoirs	Savoir-faire
<p>Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIX^e siècle.</p> <p>Ils réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un rendement potentiellement très proche de 1.</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>
Prérequis et limites	
<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 utilisés. La loi de Faraday est hors programme.</p>	

SITUATION 1

L'objectif de cette situation est de vérifier que le vocabulaire élémentaire à propos de l'énergie est maîtrisé : formes d'énergie, conversion et représentation des conversions d'énergie. C'est aussi l'occasion d'aborder les pertes d'énergie sous forme d'énergie thermique et le principe de conservation de l'énergie.

Exemple de réponse attendue

La lampe électrique convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique avec des pertes sous forme d'énergie thermique.



En classe de T^{ale} enseignement scientifique

Dans cette partie du programme, on aborde les conversions d'énergie exploitées pour obtenir de l'énergie électrique. Dans l'**activité 2**, les élèves exploitent la conversion d'énergie qui a lieu dans un alternateur et le rendement de ce dispositif. Dans l'**activité 3**, ils s'intéressent à la conversion d'énergie dans les cellules photovoltaïques.

SITUATION 2

L'objectif de cette situation est de rappeler la notion de spectre et le vocabulaire associé : spectre d'émission de raies.

Exemple de réponse attendue

Il s'agit d'un spectre d'émission de raies. Il comprend deux raies.

En classe de T^{ale} enseignement scientifique

Dans une approche spiralaire de l'enseignement de la physique-chimie, les élèves vont comprendre dans l'**activité 3** que l'interprétation des spectres de raies d'émission découverts en classe de Seconde ouvre la voie à une nouvelle branche de la physique : la physique quantique. Une des applications de la physique quantique est la mise au point des cellules photovoltaïques.

SITUATION 3

Cette situation permet de rappeler ce que l'on appelle la caractéristique d'un dipôle et la loi d'Ohm qui permet de relier la tension U , l'intensité I et la résistance R .

Exemple de réponse attendue

Il s'agit de la caractéristique d'un conducteur ohmique (ou résistance). Cette droite met en évidence la loi d'Ohm : pour un conducteur ohmique, la tension aux bornes de la résistance U est proportionnelle à l'intensité du courant I qui la parcourt : $U = R \cdot I$.

En classe de T^{ale} enseignement scientifique

La caractéristique des dipôles et en particulier celle des conducteurs ohmiques vue en classe de Seconde est appliquée à l'étude des cellules photovoltaïques. En obtenant expérimentalement la caractéristique d'une cellule photovoltaïque dans l'**activité 4**, les élèves vont pouvoir déterminer la puissance électrique maximale fournie par la cellule et la résistance maximisant la puissance pour un éclairage donné.

ACTIVITÉS

L'**activité 1** montre comment les recherches sur le lien entre électricité et magnétisme ont permis la mise au point de l'alternateur, et illustre le lien entre recherche scientifique et innovation technologique.

L'**activité 2** s'intéresse à l'aspect énergétique de l'alternateur : conversion d'énergie, rendement et pertes.

L'**activité 3** introduit la physique quantique et quelques-uns de ses principes. Cette nouvelle branche de la physique a permis la mise au point de dispositifs innovants comme les cellules photovoltaïques qui sont étudiées expérimentalement dans l'**activité 4**.

p. 110 | **ACTIVITÉ 1**

Électricité et magnétisme

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Les alternateurs électriques exploitent le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday puis théorisé par Maxwell au XIX^e siècle. »

Savoir-faire : « Reconnaître les éléments principaux d'un alternateur (source de champ magnétique et fil conducteur mobile) dans un schéma fourni.

Analyser les propriétés d'un alternateur modèle étudié expérimentalement en classe. »

Cette activité présente l'aspect historique de la mise au point de l'alternateur (**documents 1, 2 et 4**) et montre comment des recherches de physique théorique ont finalement permis la mise au point d'un dispositif indispensable à la production d'électricité (**document 3**).

L'expérience de Faraday peut être réalisée par le professeur pour le groupe.

^{DOC} 2 Démarche expérimentale

- On relie une bobine à un ampèremètre. Plus l'aimant va vite au voisinage de la bobine et plus le courant est important. Le signe du courant change lorsqu'on change le pôle de l'aimant approché. Le signe change entre l'approche et l'éloignement de l'aimant.
- Lorsqu'on saupoudre de la poudre de fer au-dessus d'une plaque transparente disposée sur un aimant, on constate que la poudre de fer trace des lignes qui reflètent le champ magnétique créé par l'aimant.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Dans l'expérience d'Orested (document 1) : l'électricité crée du magnétisme : un fil conducteur traversé par un courant dévie une boussole et une boussole détecte le magnétisme.

Dans l'expérience de Faraday (document 2) : un aimant en mouvement près d'un fil conducteur crée de l'électricité.

Dans le document 3, le champ électrique E et le champ magnétique B sont liés par les équations de Maxwell.

2. Pour fabriquer un alternateur, il faut une source de champ magnétique et un fil conducteur.

3. L'élément numéroté 1 dans les deux machines est une bobine et l'élément numéroté 2 est un aimant.

Dans la machine de Gramme, la manivelle fait tourner la bobine à l'intérieur de l'aimant, ce qui crée de l'électricité dans le fil de la bobine. Dans la machine de Pixii, la manivelle fait tourner l'aimant à l'intérieur de la bobine, ce qui crée de l'électricité dans le fil de la bobine.

4. Des recherches théoriques entre électricité et magnétisme ont conduit à la mise au point d'un élément indispensable à la production d'électricité mondiale : l'alternateur.

L'alternateur

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Ils réalisent une conversion d'énergie mécanique en énergie électrique avec un rendement potentiellement très proche de 1. »

Savoir-faire : « Définir le rendement d'un alternateur et citer un phénomène susceptible de l'influencer. »

Dans cette activité, on s'intéresse à l'utilisation de l'alternateur dans la production d'électricité : place dans les centrales (**document 1**), rendement (**document 2**) et pertes (**document 3**). Le rendement des alternateurs est proche de 1 dans les centrales, il y a donc peu de pertes. Les différents types de centrales et les pertes par effet Joule seront étudiés plus en détail dans les deux chapitres suivants.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. On retrouve l'alternateur dans tous les dispositifs de production d'électricité excepté les panneaux photovoltaïques (documents 1 et 4).

2. Dans chaque dispositif qui produit de l'électricité avec l'alternateur, l'alternateur est mis en mouvement par une turbine ou par les pales. C'est ce mouvement qui est à l'origine de l'obtention d'électricité. L'alternateur convertit donc l'énergie mécanique en énergie électrique avec des pertes sous forme d'énergie thermique comme dans la majorité des conversions d'énergie. On a donc :



3. Pour l'alternateur de l'éolienne :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{fournie}}} = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{mécanique}}} = \frac{4\,030}{4\,250} = 0,95.$$

4. Le rendement n'est pas égal à 1 car toute l'énergie mécanique n'est pas convertie en énergie électrique : il y a des pertes sous forme d'énergie thermique par échauffement dans les fils électriques ou par frottements. Pour maximiser ce rendement, il faut donc minimiser les sources de frottements, les longueurs des fils et les connexions électriques.

De la physique quantique aux semi-conducteurs

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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.

L'exploitation technologique des matériaux semi-conducteurs, en particulier du silicium, en est également une conséquence.

Ces matériaux sont utilisés en électronique et sont constitutifs des capteurs photovoltaïques. Ceux-ci absorbent l'énergie radiative et la convertissent en énergie électrique. »

Savoir-faire : « Interpréter et exploiter un spectre d'émission atomique.

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. »

Les diagrammes d'énergie des atomes et l'explication des spectres d'absorption et d'émission ont été vus par les élèves de spécialité physique-chimie mais pas par les élèves suivant d'autres spécialités. Ces élèves ne sont pas familiers avec l'unité électron-volt. L'unité utilisée ici est uniquement le joule et sur les diagrammes d'énergie les valeurs n'ont pas été volontairement indiquées.

La vidéo bonus permet d'aller plus loin dans la théorie des bandes.

Une animation bonus illustre la notion de semi-conducteurs et permet de tester des matériaux semi-conducteurs de différentes valeurs de gap de façon à comprendre lesquels sont les mieux adaptés à la construction des cellules photovoltaïques.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. La lumière a un aspect particulière et l'énergie est quantifiée (document 1). La quantification de l'énergie des atomes est représentée sur les diagrammes d'énergie (document 2).

2. La perte d'énergie d'un atome de mercure excité correspond au passage d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie inférieur. Cette perte d'énergie se traduit par l'émission d'un photon de

longueur d'onde donnée qui correspond à une raie colorée sur le spectre d'émission de l'atome de mercure.

3. Un matériau semi-conducteur est un matériau qui devient conducteur lorsqu'il reçoit une énergie supérieure à l'énergie de sa bande interdite.

4. Pour être utilisé dans les capteurs photovoltaïques, un matériau doit être semi-conducteur et son spectre d'absorption doit recouvrir au maximum le spectre d'émission solaire, ce qui dépend, entre autres, de la valeur de sa bande interdite. De cette manière, un maximum de photons émis par le Soleil peuvent être absorbés et aboutir à la production d'électricité.

Étude d'une cellule photovoltaïque

Cette activité a pour objectif de traiter la partie suivante du programme :

Savoir-faire : « Tracer la caractéristique $i(u)$ d'une cellule photovoltaïque et exploiter cette représentation pour déterminer la résistance d'utilisation maximisant la puissance électrique délivrée. »

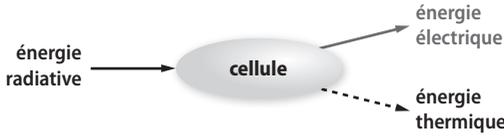
Le **document 3** propose une manipulation facile à réaliser par les élèves ; il faut veiller à ne pas trop approcher la lampe de la cellule, et à ce que la cellule soit éclairée de manière homogène dans la mesure du possible. On peut demander à chaque groupe de réaliser des mesures d'éclairages différents et comparer les résultats obtenus (si la cellule utilisée est identique). On peut aussi étudier différentes technologies de cellules.

L'animation bonus permet d'observer l'influence de l'éclairage, de l'inclinaison, de la température, du nombre de cellules et du branchement des cellules sur la caractéristique. Les élèves peuvent mesurer la puissance électrique maximale et faire les mesures conduisant à la valeur de la résistance maximisant la puissance. Cela permet donc un prolongement de l'activité expérimentale ou de palier à l'activité expérimentale.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Une cellule photovoltaïque utilise la lumière du Soleil pour produire de l'électricité. Elle convertit donc l'énergie radiative en énergie électrique avec des pertes sous forme d'énergie thermique comme dans la plupart des conversions d'énergie.

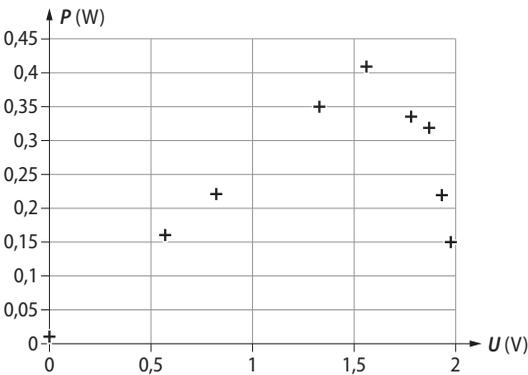
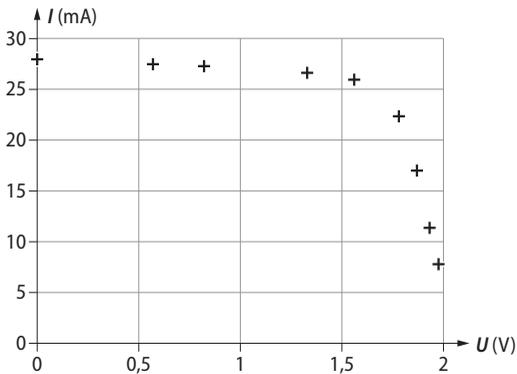
On peut représenter la conversion d'énergie de la manière suivante :



2. On obtient par exemple les mesures suivantes pour une cellule de 26,1 cm² et une puissance reçue de 0,75 W.

R (Ω)	260	170	110	80	60	50	30	20	0
U (V)	1,97	1,93	1,87	1,78	1,56	1,33	0,82	0,57	0,00
I (mA)	7,58	11,4	17,0	22,3	26,0	26,6	27,3	27,5	28,0
P (W)	0,15	0,22	0,32	0,34	0,41	0,35	0,22	0,16	0,01

On trace les courbes $I = f(U)$ et $P = g(U)$:



On lit :

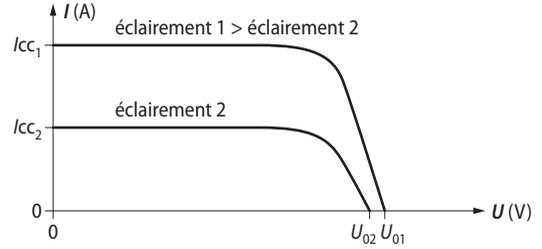
$$U_0 = 2,0 \text{ V ;}$$

$$I_{cc} = 27,8 \text{ mA ;}$$

$$P_m = 0,41 \text{ W pour } U_m = 1,56 \text{ V et } I_m = 0,026 \text{ A.}$$

$$\text{On a } R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1,56}{0,026} = 60 \text{ } \Omega.$$

3. Plus l'éclairement augmente et plus I_{cc} augmente. U_0 augmente légèrement.



CORRECTION DES EXERCICES

p. 121 ■

Vérifier ses connaissances

1 Question à choix multiple

A- 2 et 3. C'est le moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, la proposition 1 est donc fausse.

B- 1 et 2. L'énergie sortante est l'énergie électrique, l'énergie entrante est mécanique, la proposition 3 est donc fausse.

C- 1 et 3. Le panneau solaire n'utilise pas l'énergie thermique, la proposition 2 est donc fausse.

D- 2 et 3. À la proposition 1, la caractéristique est celle d'un conducteur ohmique.

2 Appliquer le cours

1. Oui, l'élément central de l'éolienne est l'alternateur.

2. Oui, l'éolienne convertit le mouvement en électricité.

3. Non, l'éolienne n'utilise pas l'énergie radiative.

4. Oui, l'alternateur dans l'éolienne utilise le lien entre le magnétisme et l'électricité.

5. Non.

3 Comprendre le cours

1. a. Il s'agit de l'alternateur.

b.



$$2. \eta = \frac{E_{\text{électrique}}}{E_{\text{mécanique}}} = \frac{1,3}{1,4} = 0,93.$$

4 Retour sur les problématiques

• Quelles découvertes ont permis la mise au point de l'alternateur ?

Les découvertes du lien entre magnétisme et électricité ont permis la mise au point de l'alternateur. On peut citer :

- l'expérience d'Oersted qui montre que l'électricité engendre du magnétisme ;
- l'expérience de Faraday qui montre que le magnétisme engendre de l'électricité.

• Comment la physique quantique est-elle à l'origine des panneaux photovoltaïques ?

La physique quantique explique le comportement de la matière à l'échelle de l'infiniment petit. La compréhension de l'interaction entre lumière et matière (absorption, émission) a permis l'élaboration de matériaux innovants exploitant les semi-conducteurs, ce qui a conduit à la mise au point des cellules photovoltaïques.

5 Exploiter un graphe

1. Le germanium absorbe une partie du spectre solaire.
2. On l'utilise dans les cellules photovoltaïques pour convertir l'énergie radiative en énergie électrique.

p. 122 ■

Exercice similaire

7 Un panneau solaire

1. Il s'agit de la caractéristique.
2. Éclairement 3 < Éclairement 2 < Éclairement 1 car $I_{cc1} > I_{cc2} > I_{cc3}$.
3. a. $I_{cc} = 6 \text{ A}$.
- b. $U_0 = 36 \text{ V}$.
- c. On lit (5,6 A ; 26 V) pour le point de fonctionnement à puissance maximale.
- d. $R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{26}{5,6} = 4,6 \Omega$.

p. 123 ■

S'entraîner

8 À bicyclette

1. a. L'élément 1 est un aimant, l'élément 2 est une bobine de fil conducteur.
- b. L'aimant est une source de champ magnétique. La bobine est un enroulement de fil conducteur dans lequel le courant va être créé.
- c. Le rotor indique la partie qui tourne. Le stator est la partie fixe donc statique du dispositif.

2. a.



b. Cela signifie que si on fournit x énergie mécanique, on récupère $0,4x$ énergie électrique.

c. Il faut relier les deux extrémités du stator à un ampèremètre pour mesurer le courant créé lorsque le rotor est en mouvement dans le stator.

9 L'expérience de Colladon

1. Jean-Daniel Colladon cherchait à mettre en évidence le lien entre électricité et magnétisme, puisque le galvanomètre (ampèremètre) mesure l'intensité du courant électrique, et que l'aimant est une source de magnétisme.

2. Le courant se mesure lorsque l'aimant est en mouvement, et le temps d'aller mesurer le courant, l'aimant était redevenu fixe. Il aurait pu mesurer un courant si l'ampèremètre était dans la même pièce et face à lui.

3. a. Mickaël Faraday a détecté un courant électrique avec une expérience similaire.

b. L'alternateur est à l'origine de cette découverte.

10 Le silicium

1. On voit sur ces diagrammes que l'énergie ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, c'est ce que l'on appelle la quantification de l'énergie.

2. a. Le diagramme a explique le spectre d'émission : le passage d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie inférieur par l'émission d'un photon de longueur d'onde donnée se traduit par une raie colorée sur le spectre.

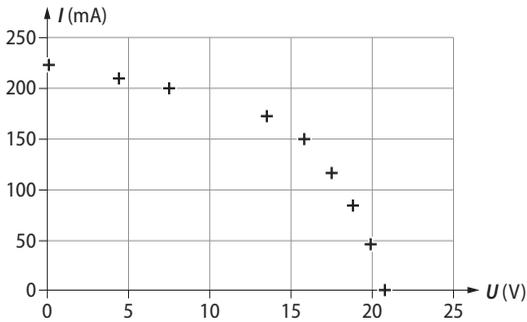
b. Le diagramme b permet d'expliquer l'effet photovoltaïque. Lorsqu'un photon d'énergie supérieure à celle de la bande interdite est absorbé, un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, ce qui est exploité dans l'effet photovoltaïque.

11 Étude expérimentale d'une cellule photovoltaïque

1. a. L'ampèremètre permet de mesurer l'intensité du courant électrique.

b. Le voltmètre permet de mesurer la tension aux bornes de la cellule.

2.



3.

i	U V	I mA	P mW
0	0,0610	224,0	13,66
1	4,400	210,0	924,0
2	7,500	200,0	1500
3	13,50	173,0	2336
4	15,80	150,0	2370
5	17,50	116,0	2030
6	18,80	84,10	1581
7	19,90	45,50	905,4
8	20,80	0,000	0,000

4. a. On trouve $P_m = 2,4 \text{ W}$ or le constructeur indique $P_m = 5 \text{ W}$.

On mesure $I_{cc} = 224 \text{ mA}$ or le constructeur indique 410 mA , et $U_0 = 20,8 \text{ V}$ or le constructeur indique $U_0 = 21 \text{ V}$. On mesure des valeurs plus petites que celles indiquées par le constructeur.

b. Les données du constructeur sont indiquées pour un éclairage de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ et celui exploité dans l'expérience doit être plus faible, ce qui explique l'écart entre les données du constructeur et celles mesurées expérimentalement.

12 Associations de cellules

1. Pour le point A :

$$I = 0,48 \text{ A et } U = 0 \text{ V, donc } P = U \cdot I = 0 \text{ W.}$$

Pour le point B :

$$I = 0,47 \text{ A, } U = 5,0 \text{ V ; } P = 0,47 \times 5,0 = 2,4 \text{ W.}$$

Pour le point C :

$$I = 0,20 \text{ A et } U = 5,8 \text{ V ; } P = 0,20 \times 5,8 = 1,2 \text{ W.}$$

Le point qui conduit à la puissance maximale est donc le point B.

2. a. On a la relation suivante pour les résistances : $U = R \cdot I$. Donc $I = \frac{U}{R} = U \cdot \left(\frac{1}{R}\right)$ donc le tracé

de I en fonction de U est une droite qui passe par l'origine de coefficient directeur $\frac{1}{R}$.

b. Pour déterminer le coefficient directeur de la droite qui passe par le point B, on choisit deux points faciles à repérer $(0,18 ; 2)$ et $(0 ; 0)$, puis on calcule :

$$\frac{0,18 - 0}{2 - 0} = 0,09 \text{ donc } \frac{1}{R_m} = 0,09 \text{ et } R_m = \frac{1}{0,09} = 11 \Omega.$$

3. Pour l'association des 5 cellules en série :

$$I_{cc} = 0,48 \text{ A et } U_0 = 5 \times 6 = 30 \text{ V.}$$

Pour l'association des 5 cellules en dérivation :

$$I_{cc} = 5 \times 0,48 = 2,4 \text{ A et } U_0 = 6 \text{ V.}$$

13 Modèle de Bohr

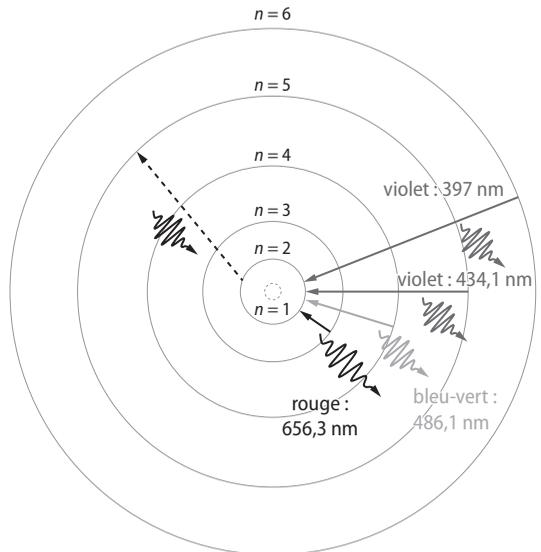
1. On peut citer : « et n'ont accès qu'à certaines valeurs d'énergie ».

2. a. On peut utiliser une lampe spectrale : une ampoule qui contient l'élément sous forme gazeuse est soumise à une décharge électrique. On décompose ensuite la lumière émise avec un dispositif dispersif (prisme ou réseau). Ces spectres sont des spectres de raies.

b.



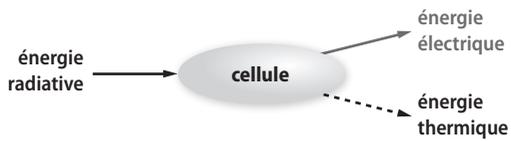
c.



14 Préparation BAC La cellule triple jonction

1. Ces trois jonctions exploitent au mieux l'énergie radiative du Soleil puisqu'à elles trois, elles recouvrent une bonne partie du spectre d'émission du Soleil.

2. On peut représenter la conversion d'énergie de la manière suivante :



3. a. On lit sur le graphique : $P_m = 33 \text{ mW}$.

b. On lit $U_m = 3,0 \text{ V}$ et $I_m = 12,5 \text{ mA}$. On a :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{3,0}{0,0125} = 240 \Omega.$$

c. $\eta = \frac{33}{89} = 0,37 \times 100 = 37 \%$.

Le rendement est bien supérieur au rendement moyen de 15 % des cellules actuelles.

Les atouts de l'électricité

LE PROGRAMME

2. Le futur des énergies

2.2 – Les atouts de l'électricité

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>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>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>Analyser des documents présentant les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques (métaux rares, etc.).</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>Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique).</p>
Prérequis et limites	
<p>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>	

SITUATION 1

Dans cette première situation, les élèves sont invités à remobiliser le vocabulaire rencontré au cycle 4 sur l'énergie. Il s'agit également de revenir sur la distinction entre sources et formes d'énergie.

Exemple de réponse attendue

Source	Formes
Soleil	Énergie radiative
Vent	Énergie éolienne
Terre	Énergie géothermique
Eau	Énergie mécanique
Pétrole/gaz/charbon	Énergie thermique

En classe de T^{ale} enseignement scientifique

Les sources et les formes d'énergie ont été régulièrement rencontrées par tous les élèves au collège et au lycée. En Terminale enseignement scientifique, ce vocabulaire est réinvesti pour qualifier les conversions d'énergies qui permettent d'obtenir de l'énergie électrique en mettant en jeu ou non une combustion. L'activité 1 permettra aux élèves de remobiliser ce vocabulaire.

SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien identifié au cours du cycle 4 et en classe de Seconde les notions de puissance et d'énergie ainsi que les unités correspondantes.

Exemple de réponse attendue

L'unité indiquée sur le compteur électrique est le kWh. Il s'agit d'une unité qui permet d'exprimer une énergie, elle est directement proportionnelle au joule (unité du système international).

La relation entre la puissance et l'énergie s'écrit $E = P \cdot \Delta t$ où Δt correspond à la durée d'utilisation du dispositif étudié.

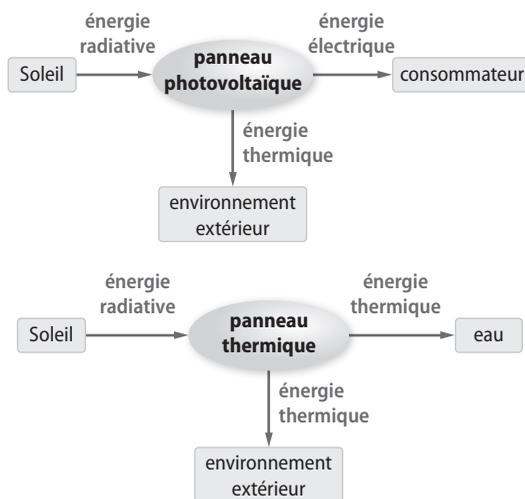
En classe de T^{ale} enseignement scientifique

Cette relation quantitative qui relie P , E et Δt est normalement connue par les élèves depuis le cycle 4. En Terminale, elle pourra être mobilisée dans les calculs de rendement des systèmes de conversion. Dans l'activité 2, l'étude expérimentale de la conversion d'énergie éolienne-électrique mobilisera les notions de puissance électrique et d'énergie.

SITUATION 3

Dans cette troisième situation, les élèves sont invités à réinvestir la représentation symbolique de chaînes de transformations énergétiques. Déjà rencontré au cycle 4 et en classe de Première, ce mode de représentation simple permet la mise en évidence des différentes conversions d'énergie permettant le passage de la ressource primaire à l'énergie électrique.

Exemple de réponse attendue



En classe de T^{ale} enseignement scientifique

Les élèves vont s'appuyer sur ces schémas pour appréhender les dispositifs de conversion dans leur globalité et repérer les impacts environnementaux associés. Dans les activités 3 et 4, les élèves s'appuieront sur des chaînes de conversion pour identifier les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques et comprendre la nécessité de différents dispositifs de stockage d'énergie.

ACTIVITÉS

On examine dans ce chapitre la production de l'énergie électrique sous différents angles pour en faire ressortir les atouts mais également les inconvénients au niveau environnemental. Les enjeux d'avenir en termes de ressources et de stockage sont également abordés.

L'activité 1 permet aux élèves de remobiliser le vocabulaire rencontré dans sa formation et de distinguer sources et formes d'énergie. La chaîne d'énergie est également réintroduite comme outil analytique du fonctionnement des dispositifs d'obtention d'énergie électrique.

Dans l'**activité 2**, l'élève aborde l'étude détaillée d'un convertisseur d'énergie sans combustion. Une modélisation expérimentale est proposée pour en comprendre les performances et les limites.

L'**activité 3** permet de montrer aux élèves que les dispositifs de conversion d'énergie ont des impacts environnementaux divers et peuvent présenter des risques.

Dans l'**activité 4**, la nécessité du stockage de l'énergie électrique et la comparaison de différents dispositifs de stockage d'énergie est réalisé selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique).

p. 128 ■ **ACTIVITÉ 1**

La production d'énergie électrique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion. »

Savoir-faire : « Décrire des exemples de chaînes de transformations énergétiques permettant d'obtenir de l'énergie électrique à partir de différentes ressources primaires d'énergie. »

Le **document 1** permet d'identifier différents modes de production d'énergie électrique.

Le **document 2** permet de réintroduire le vocabulaire sur les sources et formes d'énergie.

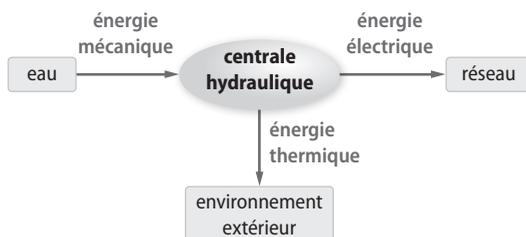
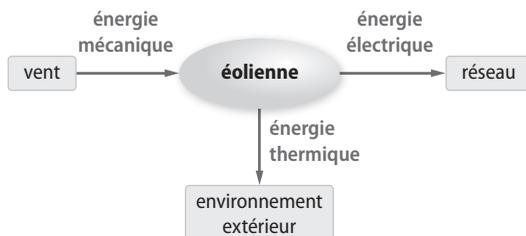
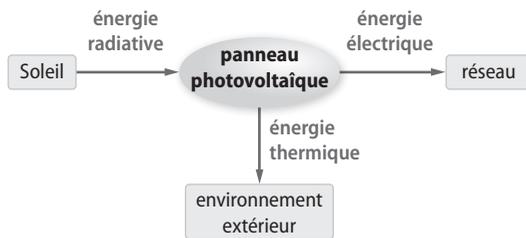
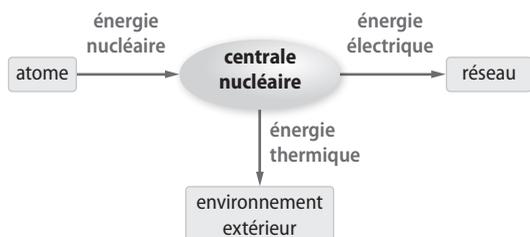
Le **document 3** permet de revenir sur la construction d'une chaîne d'énergie.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Dans le document, différents dispositifs permettent de produire de l'énergie électrique sans combustion : centrale hydraulique, centrale nucléaire, panneaux photovoltaïques, éoliennes.

2. La production d'énergie électrique sans combustion permet de ne pas libérer de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et de réduire l'impact climatique de la production énergétique.

3. Représentation des chaînes de conversion d'énergie :



p. 130 ■ **ACTIVITÉ 2**

Production d'énergie électrique avec le vent

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion. »

Savoir-faire : « Décrire des exemples de chaînes de transformations énergétiques permettant d'obtenir de l'énergie électrique à partir de différentes ressources primaires d'énergie. »

« Calculer le rendement global d'un système de conversion d'énergie. »

Le **document 1** permet d'identifier les paramètres d'influence d'une éolienne et de comprendre l'influence de la vitesse du vent sur la puissance produite.

Le **document 2** fournit des données numériques utiles aux pistes de travail proposées.

Le **document 3** pose la définition du rendement d'un convertisseur d'énergie.

Le **document 4** propose une modélisation expérimentale d'une éolienne en mesurant la vitesse de l'air mis en mouvement par un ventilateur et la puissance électrique produite par une petite génératrice.

2 Pour mener une investigation

Exemple de correction

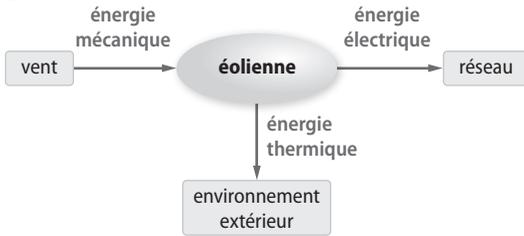
Le graphique représenté en figure **b** permet d'évaluer les grandeurs suivantes : puissance maximale produite : 40 kW ; vitesse à partir de laquelle cette puissance est produite : 15 m · s⁻¹ ; vitesse à partir de laquelle la puissance devient non nulle : 3 m · s⁻¹.

Ces valeurs sont proches des trois premières données fournies par le constructeur (figure *a*). Les données suivantes ne peuvent pas être vérifiées à partir du graphique.

Exemple de correction des pistes de travail

1. D'après le document 1, la puissance du vent est proportionnelle à la vitesse au cube v^3 . Cette puissance augmente donc l'influence du paramètre v .

2.



3. La puissance électrique produite par l'éolienne vaut :

$$P_{\text{utile}} = 40 \text{ kW} = 40 \times 10^3 \text{ W.}$$

La puissance mécanique du vent vaut :

$$P_{\text{reçue}} = \frac{\pi}{8} \times 1,3 \times 8^2 \times 14^3 = 89 \text{ kW} = 89 \times 10^3 \text{ W.}$$

Le rendement de l'éolienne vaut donc :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = 0,45 \text{ soit } 45 \text{ \%.}$$

4. La puissance électrique produite par l'éolienne vaut :

$$P_{\text{utile}} = U \cdot I = 1,23 \times 0,050 = 62 \text{ mW.}$$

La puissance mécanique du vent vaut :

$$P_{\text{reçue}} = \frac{\pi}{8} \times 1,3 \times 0,115^2 \times 3,2^3 = 0,22 \text{ W.}$$

Le rendement de l'éolienne vaut donc :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = 0,28 \text{ soit } 28 \text{ \%.}$$

Impacts environnementaux de la production électrique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Les méthodes sans combustion ont néanmoins un impact sur l'environnement et la biodiversité ou présentent des risques spécifiques (pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels...) »

Savoir-faire : « Analyser des documents présentant les conséquences de l'utilisation de ressources géologiques (métaux rares, etc.) »

Le **document 1** sensibilise les élèves aux différents types d'impacts environnementaux liés aux modes de production d'énergie électrique.

Le **document 2** présente le cycle de vie complet d'une éolienne et permet d'appréhender l'impact complet de ce type d'installation tout au long de sa vie.

Le **document 3** propose une animation vidéo autour des déchets générés par les centrales nucléaires et les risques qu'ils peuvent présenter.

Le **document 4** présente l'impact carboné des différents modes de production d'énergie électrique.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Tous les dispositifs de production d'énergie électrique génèrent des déchets et consomment des ressources fossiles lors de leur construction et de leur démantèlement. Les dispositifs à combustions, utilisant le charbon, le pétrole ou le gaz, produisent des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique.

2. L'impact environnemental d'un dispositif de production d'énergie électrique ne se limite pas à la durée de son exploitation. Sa construction, son installation puis sa suppression peuvent également avoir un impact fort sur l'environnement et la biodiversité.

3. D'après le document 4, les deux dispositifs qui présentent le meilleur bilan carbone sont les centrales hydroélectriques et les centrales nucléaires. Elles ont toutefois d'autres impacts importants sur l'environnement. En effet, les constructions de ces types de centrales sont des chantiers immenses et longs, très coûteux en énergie. Elles présentent des risques d'accident. De plus, les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs à longue durée de vie.

Stocker l'énergie : mission impossible ?

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Pour faire face à l'intermittence liée à certains modes de production ou à la consommation, l'énergie électrique doit être convertie sous une forme stockable : énergie chimique (accumulateurs) ; énergie potentielle (barrages) ; énergie électromagnétique (supercapacités). »

Savoir-faire : « Comparer différents dispositifs de stockage d'énergie selon différents critères (masses mises en jeu, capacité et durée de stockage, impact écologique). »

Le **document 1** pose le cadre de la problématique posée par la nécessité du stockage de l'énergie électrique.

Le **document 2** présente les différents modes de stockage en précisant les durées approximatives pendant lesquelles l'énergie peut être conservée.

Le **document 3** compare les critères de performance de trois dispositifs de stockage d'énergie : le pompage hydraulique, les accumulateurs Li-ion et les supercapacités.

Le **document 4** montre graphiquement, pour différents dispositifs de stockage, l'ordre de grandeur de la durée de stockage, la puissance disponible et l'énergie accumulée.

Le **document 5** présente le principe des supercapacités et leur capacité de stockage.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Pour faire face à l'intermittence liée à certains modes de production (dépendant des conditions météorologiques par exemple) ou à la consommation, l'énergie électrique doit être convertie sous une forme stockable pour assurer une distribution indépendante des contraintes de production.

2. D'après le document 3, le système de pompage hydraulique permet de stocker une importante quantité d'énergie pendant des durées importantes et sans présenter de risques importants.

3. D'après le document 4, la pile à hydrogène permet de stocker davantage d'énergie, pendant une durée plus importante, en développant une puissance plus significative. Dans l'avenir, la pile à hydrogène pourrait devenir une solution de stockage très prometteuse.

■ Vérifier ses connaissances

1 Questions à choix multiple

A- 3

B- 3

C- 1 et 2

D- 2 et 3

2 Avoir un regard critique

a. Un convertisseur en fonctionnement permet la conversion d'une forme d'énergie en une autre.

b. Dans une chaîne énergétique, l'énergie dissipée apparaît.

c. Le rendement énergétique d'un convertisseur est un nombre sans unité.

d. Il existe des dispositifs de production d'électricité sans combustion : éolienne, panneau photovoltaïque, géothermie, etc.

e. Tous les dispositifs de conversion d'énergie ont un impact environnemental.

f. Il est possible de stocker de l'énergie sous différentes formes.

3 Restituer le cours

a. Exemples de sources d'énergie : le Soleil, le vent, le pétrole, etc.

Exemples de formes d'énergie : électrique, chimique, radiative, mécanique, thermique, etc.

b. Le rendement d'un convertisseur est une grandeur qui permet d'évaluer l'efficacité de la conversion d'énergie ; il est égal au rapport de l'énergie utile délivrée par le convertisseur sur l'énergie

qu'il a reçue à l'entrée : $\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{reçue}}}$.

Il peut s'écrire aussi $\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}}$ avec P_{utile} la puissance utile à la sortie du convertisseur et $P_{\text{reçue}}$ la

puissance reçue à l'entrée.

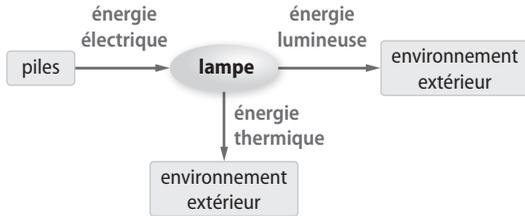
c. Exemples de convertisseurs ne mettant pas en jeu de combustion : des accumulateurs lithium-ion, des panneaux photovoltaïques.

d. Les principaux impacts de la production d'énergie sont des impacts sur l'environnement et la biodiversité (épuisement des ressources fossiles, émissions de gaz à effet de serre, pollutions environnementales).

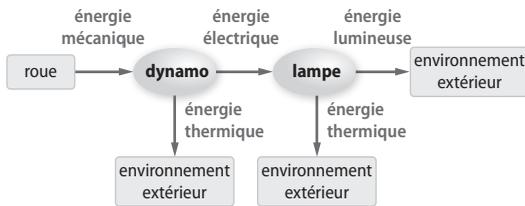
e. Exemples de solutions de stockage d'énergie : accumulateurs (énergie chimique), pompes hydrauliques (énergie potentielle), supercondensateurs (énergie électromagnétique).

4 Réaliser un schéma

Type 1 :



Type 2 :



5 Retour sur les problématiques

• **Quels sont les modes de production de l'énergie électrique et comment stocker cette énergie ?**

L'énergie électrique présente de nombreux avantages : une distribution aisée sur des réseaux de distribution très étendus, une production en grande quantité, une exploitation diverse permettant de répondre en grande partie aux besoins énergétiques de l'Homme : se chauffer, se déplacer, s'éclairer, se nourrir, etc.

L'obtention d'énergie électrique s'appuie sur des dispositifs appelés convertisseurs qui assurent la conversion en énergie électrique d'autres formes d'énergie. Dans la perspective d'un développement durable, des procédés de conversion sans combustion jouent un rôle central. Il existe trois principales méthodes permettant d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion :

- la conversion d'énergie mécanique, soit directe (dynamos, éoliennes, hydroliennes, barrages hydroélectriques), soit indirecte à partir d'énergie thermique (centrales nucléaires, centrales solaires thermiques, géothermie) ;
- la conversion de l'énergie radiative reçue du Soleil (panneaux photovoltaïques) ;
- la conversion électrochimique (piles ou accumulateurs conventionnels, piles à hydrogène).

Pour faire face à l'intermittence liée à certains modes de production ou à la consommation, l'énergie électrique doit être convertie sous une forme stockable : énergie chimique (accumulateurs) ; énergie potentielle (barrages) ; énergie électromagnétique (super-condensateurs).

• **Quels sont les impacts environnementaux des différents modes de production d'énergie ?**

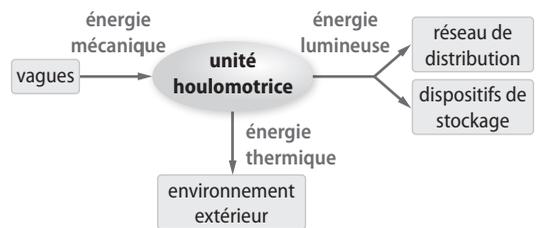
Ces méthodes de production et de stockage d'énergie électrique, y compris les procédés sans combustion, ont toutes un impact sur l'environnement et la biodiversité (épuisement des ressources fossiles, émissions de gaz à effet de serre, ou présentent des risques spécifiques (pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels...)).

p. 140 ■

Exercice similaire

7 Énergie houlomotrice

1. Chaîne de transformation énergétique :



2. Ce type de centrale présente plusieurs inconvénients : elle se trouve en mer, ce qui impose des contraintes lors des visites de maintenance, elle est soumise aux intempéries (forts vents, tempêtes), elle subit la corrosion marine, etc.

3. Les deux systèmes de stockage sont complémentaires, ils apportent une solution adaptée selon la durée de stockage désirée.

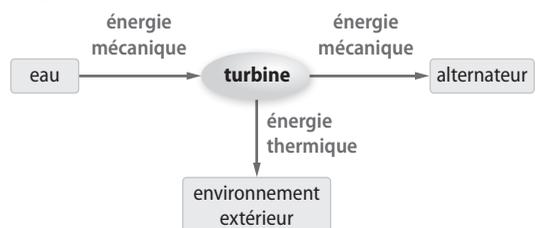
4. $\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{30}{120} = 0,25$ soit un rendement de 25 %.

p. 141 ■

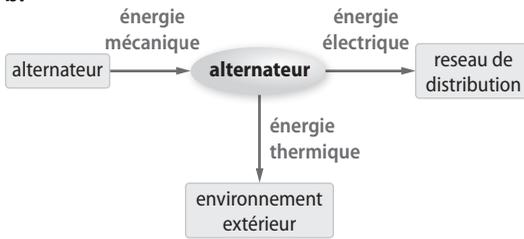
S'entraîner

8 Barrage hydroélectrique

1. a.



b.



2. a. On note P_{eau} la puissance fournie par l'eau à la turbine, P_{turbine} la puissance délivrée par la turbine et P_{alt} la puissance électrique à la sortie de l'alternateur. Les rendements s'écrivent :

$$\eta_t = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{eau}}} \text{ et } \eta_a = \frac{P_{\text{alt}}}{P_{\text{turbine}}}.$$

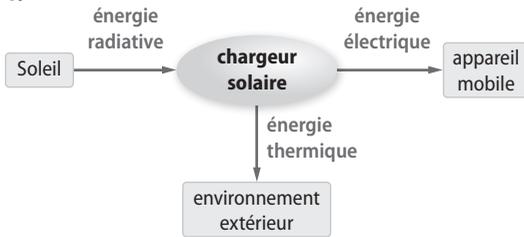
Le rendement total s'écrit donc :

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_a = \frac{P_{\text{alt}}}{P_{\text{eau}}}.$$

b. $\eta = 0,55 \times 0,75 = 0,41$ soit 41 %.

9 Chargeur solaire

1.



2. Sur le graphique, on peut lire que la puissance maximale correspond à une abscisse de 5,0 V.

Cette valeur de tension correspond à la tension délivrée par les ports USB.

3. • Calcul de la puissance reçue par la cellule sous forme radiative :

$$P_{\text{soleil}} = 500 \times 0,168 \times 0,168 = 14,1 \text{ W.}$$

• Calcul de la puissance électrique délivrée par le chargeur :

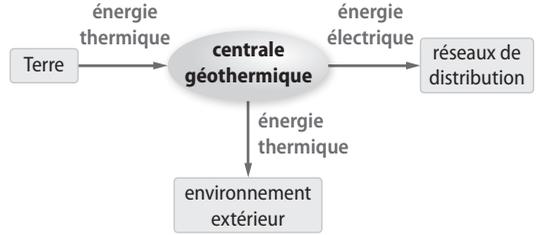
$$P_{\text{élec}} = U \cdot I = 5,0 \times 380 \times 10^{-3} = 1,9 \text{ W.}$$

• Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_{\text{élec}}}{P_{\text{soleil}}} = \frac{1,9}{14,1} = 0,13 \text{ soit } 13 \text{ \%}.$$

10 Géothermie

1.



2. Une centrale géothermique permet d'obtenir de l'énergie électrique sans combustion. Elle a donc un impact environnemental beaucoup plus réduit qu'une centrale à combustion classique. De plus, ce type de centrale utilise une source d'énergie renouvelable et ne consomme aucune ressource fossile.

3. Énergie produite par la centrale de Bouillante durant une année :

$$E = P \cdot \Delta t \text{ avec } P = 15 \text{ MW} = 15 \times 10^6 \text{ W et}$$

$$\Delta t = 365 \text{ jours} = 265 \times 24 \times 3\,600 = 3,15 \times 10^7 \text{ s.}$$

$$\text{D'où } E = 15 \times 10^6 \times 3,15 \times 10^7$$

$$E = 4,7 \times 10^{14} \text{ J} = 4,7 \times 10^2 \text{ GJ.}$$

Cette valeur correspond à l'énergie produite par 47 tonnes de pétrole (soit plusieurs camions-citernes).

11 Stockage d'énergie par pompage d'eau

1. a. Dans une centrale STEP, l'énergie électrique sert à pomper de l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. Le stockage d'énergie est donc réalisé sous forme mécanique.

b. On parle de turbine réversible car elle permet une conversion d'énergie électrique/mécanique dans les deux sens de circulation d'eau.

2. Les dispositifs éoliens et solaires produisent de manière intermittente et sont soumis aux conditions climatiques. Il est donc indispensable de les associer à des dispositifs de stockages qui permettront de stocker l'énergie produite quand les conditions sont favorables et la consommation faible.

3. Les installations STEP n'ont pas d'impacts sur l'environnement lorsqu'elles sont en fonctionnement. Elles ont par contre des impacts significatifs car leurs constructions modifient largement l'environnement du site choisi et s'appuient sur la consommation de ressources fossiles (terrassement, transport de matériaux, etc.).

12 Navettes maritimes zéro émission

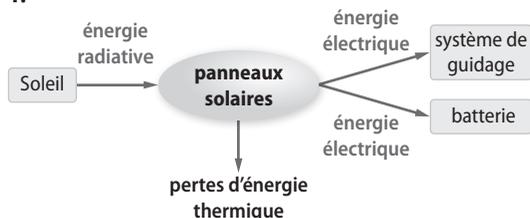
- Avantages des batteries LFP : pas de constituants polluants, longue durée de vie et grande capacité de stockage d'énergie.
- Inconvénient : coût élevé.

13 Impacts et risques des centrales

La nécessité de lutter contre le réchauffement climatique impose de limiter l'utilisation des industries émettrices de carbone. À ce titre, les centrales à combustion, n'offrent pas de perspectives intéressantes pour l'avenir. Les centrales électriques sans combustion respectent la contrainte de réduction des productions de gaz à effet de serre et de particules fines mais ils ont néanmoins un impact sur l'environnement et la biodiversité ou présentent des risques spécifiques (pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels...).

14 **Prépa BAC** Guidage spatial

1.



2. a. • Puissance reçue par les panneaux :

$$P_a = 1\,370 \times 33,6 = 46 \text{ kW.}$$

• Puissance fournie par les panneaux :

$$P_u = \eta \cdot P_a = 0,17 \times 46 = 7,8 \text{ kW.}$$

b. Si on néglige les pertes thermiques, on a :

$$P_u = P_{sg} + P_{bat} ;$$

$$\text{donc } P_{bat} = P_u - P_{sg} = 7,8 \times 10^3 - 900 = 6,9 \times 10^3 \text{ W.}$$

3. Puissance électrique : $P = U \cdot I$,

$$\text{donc } I = \frac{P}{U} = \frac{900}{57,6} = 15,6 \text{ A.}$$

4. a. $Q = I \cdot \Delta t = 15,6 \times \frac{31}{60} = 8,1 \text{ Ah.}$

b. La charge initiale est très supérieure à la charge minimale requise. Le système de guidage peut fonctionner.

Optimisation du transport de l'électricité

LE PROGRAMME

2. Le futur des énergies

2.3 – Optimisation du transport de l'électricité

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 destinatrices.</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>

Prérequis et limites

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.

La notion de graphe, abordée dans l'enseignement de sciences numériques et technologie de seconde, est ici mobilisée. 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.

Les connaissances sur les fonctions sont mobilisées.

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ

■ p. 144

● SITUATION 1

Dans cette première situation, les élèves sont invités à se rappeler l'effet Joule ou du moins sa manifestation, à savoir que tout conducteur électrique traversé par un courant chauffe.

› Exemple de réponse attendue

Un datacenter doit posséder un système de refroidissement efficace pour le protéger car, comme un ordinateur, il dégage une énergie thermique importante. Cette énergie thermique est obtenue par la conversion d'une partie de l'énergie électrique. En effet, tout conducteur électrique traversé par un courant chauffe : c'est ce qu'on appelle l'effet Joule.

› En classe de T^{le} enseignement scientifique

Le phénomène de l'effet Joule a déjà été appréhendé au cycle 4. Il est traité en classe de T^{ale} en enseignement scientifique dans le cadre de la problématique du transport de l'électricité.

L'activité 1 permettra aux élèves de mettre en évidence l'effet Joule, de comprendre son origine et ses effets (qui peuvent être dans certains cas un avantage et dans d'autres un inconvénient).

Dans les activités 2 et 4, ils verront comment il est possible de minimiser l'effet Joule dans le transport de l'électricité.

● SITUATION 2

Il s'agit ici de vérifier que les élèves ont bien assimilé au cours du cycle 4 et en classe de Seconde les notions de puissances P , de tension U et d'intensité I et notamment la loi qui relie ces trois grandeurs : $P = U \cdot I$. Comme le précise le programme, cette relation quantitative connue pour le courant continu est admise pour le courant alternatif.

› Exemple de réponse attendue

Comme $P = U \cdot I$, on a $I = \frac{P}{U}$.

Le sèche-cheveux a une puissance de 1 500 W.

La tension du secteur est de 230 V.

On en déduit que $I = \frac{1\,500}{230} = 6,52$ A.

› En classe de T^{le} enseignement scientifique

Cette relation quantitative qui relie P , U et I sera utilisée à plusieurs reprises dans ce chapitre. Dans l'activité 2, elle permettra de montrer que si dans un transformateur on augmente la tension à puissance constante, alors on diminue l'intensité. Dans les activités 3 et 4, les élèves devront aussi l'utiliser pour faire le lien entre les puissances fournies ou consommées dans un réseau électrique et l'intensité qui traverse les lignes électriques.

● SITUATION 3

Dans cette troisième situation, les élèves sont invités à réinvestir les notions relatives aux graphes orientés (arc, nœud, etc.) qui ont été approchées en classe de Seconde dans l'enseignement des Sciences numériques et technologie (SNT), notamment quand le principe d'un réseau social est traité.

› Exemple de réponse attendue

Les nœuds correspondent aux utilisateurs du réseau social et les arcs orientés aux échanges entre les utilisateurs.

› En classe de T^{le} enseignement scientifique

Les élèves verront comment il est possible de modéliser un réseau électrique par un graphe orienté (activité 3). Dans l'activité 4, les élèves verront que cette modélisation est un point d'appui pour raisonner sur un réseau électrique afin de chercher à minimiser les pertes dans ce réseau.

ACTIVITÉS

On aborde dans ce chapitre l'optimisation du transport de l'électricité, les pertes par effet Joule dans les lignes électriques et ce qui est mis en œuvre pour les minimiser.

L'**activité 1** permet aux élèves d'être sensibilisés à la notion d'effet Joule. Une mise en évidence expérimentale et quantitative est proposée. L'approche microscopique est présentée permettant aux élèves de comprendre à quoi est dû l'effet Joule. Si l'effet Joule peut être un avantage (quand on cherche à chauffer), l'élève voit que ce phénomène est un inconvénient dans le cas du transport de l'électricité.

Dans l'**activité 2**, l'élève montre qu'en augmentant la tension, lors du transport de l'électricité à l'aide de transformateurs, il est possible, tout en conservant la puissance totale, de réduire l'intensité du courant qui transite dans les câbles électriques et donc de minimiser l'effet Joule.

L'**activité 3** permet de montrer aux élèves comment le modèle mathématique des graphes orientés peut modéliser un réseau électrique.

C'est dans l'**activité 4** qu'on cherchera en s'appuyant sur le modèle du graphe orienté à minimiser les pertes par effet Joule d'un réseau électrique en tenant compte de ces contraintes. On formulera mathématiquement le problème de minimisation des pertes par effet Joule, qu'on cherchera à résoudre en tenant compte notamment de la production et de la consommation électriques dans le réseau électrique étudié.

p. 146 ■ **ACTIVITÉ 1**

L'effet Joule : ça chauffe !

Cette activité a pour objectif de traiter la partie suivante du programme :

Savoir : « Au cours du transport, une partie de l'énergie électrique, dissipée dans l'environnement par effet Joule, ne parvient pas à l'utilisateur. »

Le **document 1** permet une mise en évidence expérimentale et quantitative de l'effet Joule.

Le **document 2** explique le phénomène de l'effet Joule au niveau microscopique

Le **document 3** permet de montrer que si l'effet Joule peut être dans certains cas un avantage, il est un inconvénient dans le transport de l'électricité.

^{DOC} 1 Démarche expérimentale

► Exemple de correction

- La variation de température ΔT augmente quand l'intensité I qui traverse la résistance immergée augmente.
- L'énergie reçue par la résistance immergée est l'énergie électrique. Si la température augmente, c'est que l'énergie électrique est transférée en énergie thermique. Cette dernière est appelée l'énergie dissipée par effet Joule, donc cette énergie est liée à l'intensité du courant.

^{DOC} 3 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

L'effet Joule est un avantage	L'effet Joule est un inconvénient
Grille-pain Bouilloire Anti-buée de pare-brise	Lampe Transport de l'électricité Ordinateur

► Exemple de correction des pistes de travail

1. L'effet Joule est dû au passage de l'électricité dans un conducteur. Plus l'intensité du courant qui traverse le conducteur est important (donc plus il y a des électrons en mouvement) et plus la résistance de ce conducteur est importante (donc plus le mouvement des électrons est « freiné »), donc plus le conducteur chauffe, plus une partie de l'énergie électrique est convertie en énergie thermique, et plus l'effet Joule est important.

2. Dans une ligne électrique traversée par un courant électrique, l'effet Joule est un inconvénient. En effet, l'énergie thermique qui résulte de l'effet Joule est de l'énergie perdue lors du transport de l'électricité.

p. 148 ■ **ACTIVITÉ 2**

Transport sous haute tension

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Au cours du transport, une partie de l'énergie électrique, dissipée dans l'environnement par effet Joule, ne parvient pas à l'utilisateur.

L'utilisation de la haute tension dans les lignes électriques limite les pertes par effet Joule, à puissance transportée fixée. »

Savoir-faire : « Faire un schéma d'un circuit électrique modélisant une ligne à haute tension.

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. »

Le **document 1** permet de montrer expérimentalement que la résistance d'un matériau dépend de sa longueur, de sa largeur, de son épaisseur mais aussi du matériau lui-même.

Le **document 2** permet aux élèves de s'interroger sur le choix du meilleur matériau suivant que l'électricité est transportée en aérien ou en souterrain.

Le **document 3** permet de faire découvrir aux élèves l'intérêt de transporter l'électricité sous haute tension grâce à des transformateurs. Le schéma électrique représentant la modélisation physique des transformateurs et des lignes à haute tension est présenté.

^{DOC} 1 Démarche expérimentale

► Exemple de correction

- La résistance du matériau augmente avec sa longueur et diminue avec sa largeur et son épaisseur.
- On peut montrer que la résistance dépend aussi du matériau en remplaçant le papier Canson® noir par un papier cartonné de la même dimension.

^{DOC} 2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Pour une ligne aérienne, il faudra choisir un matériau léger et ayant une résistivité faible : on pourra utiliser l'aluminium.
- Pour une ligne souterraine, il faudra choisir un matériau de faible résistivité (pour éviter trop d'échauffement par effet Joule) : on pourra choisir le cuivre.

^{DOC} 3 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Au niveau du circuit, si la valeur de la tension U_2 est 100 fois plus grande que la valeur de la tension U_1 , et si la puissance reste constante, c'est-à-dire si : $P_1 = U_1 \cdot I_1 = P_2 = U_2 \cdot I_2$, alors on aura une valeur d'intensité du courant I_2 100 fois plus faible que celle de l'intensité I_1 : $I_2 = \frac{I_1}{100}$.
- $P_J = U_2 \cdot I_1 = (R \cdot I_1) \cdot I_1 = R \cdot I_1^2$.

$$\bullet P_{\text{JHT}} = R \cdot I_2^2 \text{ avec } I_2 = \frac{I_1}{100},$$

$$\text{donc } P_{\text{JHT}} = R \cdot \left(\frac{I_1}{100}\right)^2 = \frac{R \cdot I_1^2}{10\,000} = \frac{P_J}{10\,000}$$

donc P_{JHT} est 10 000 fois plus petit que P_J .

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Lors du transport de l'électricité, on cherche à minimiser les pertes. Or ces pertes sont essentiellement dues à l'effet Joule. La puissance dissipée par effet Joule dépend de la résistance du matériau utilisé, et cette dernière dépend de sa longueur, de sa section et de la résistivité du matériau utilisé. Donc pour minimiser l'effet Joule, on utilisera des matériaux de faible résistivité (aluminium, cuivre) et de section importante.

2. L'enfouissement des lignes demande une attention particulière car il sera plus difficile de dissiper l'énergie thermique dissipée par effet Joule si la ligne est enterrée. On cherchera donc à utiliser un matériau dont la résistivité est la plus faible possible (on privilégiera le cuivre à l'aluminium).

3. Plus la longueur des câbles est importante, plus les pertes par effet Joule seront importantes. La haute tension est nécessaire pour transporter le courant électrique et pour limiter ces pertes. En effet, en augmentant la tension, à puissance constante, on diminue l'intensité du courant et donc, comme la puissance dissipée par effet Joule dépend fortement de l'intensité (en I_2), on peut diminuer notablement les pertes par effet Joule.

p. 150 ■ **ACTIVITÉ 3**

Modélisation d'un réseau électrique

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 destinatrices.

Dans ce modèle, l'objectif est de minimiser les pertes par effet Joule sur l'ensemble du réseau sous les contraintes suivantes :

- 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. »

Savoir-faire : « Modéliser un réseau de distribution électrique simple par un graphe orienté. Exprimer mathématiquement les contraintes et la fonction à minimiser. »

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. »

Le **document 1** sensibilise les élèves à la complexité d'un réseau électrique.

Le **document 2** présente aux élèves comment il est possible de modéliser un réseau électrique en utilisant le modèle mathématique des graphes orientés.

Le **document 3** présente les contraintes d'un réseau électrique qu'il convient d'intégrer dans le modèle du graphe orienté.

DOC

3 Pour mener une investigation

Exemple de correction

• La valeur du flot total en sortie du réseau découle de la puissance totale consommée :

$$P_{\text{cons(totale)}} = P_{\text{cons(industries)}} + P_{\text{cons(commerces)}} + P_{\text{cons(habitations)}}$$

donc :

$$P_{\text{cons(totale)}} = 150 \text{ MW} + 100 \text{ MW} + 250 \text{ MW} = 500 \text{ MW.}$$

I_{totale} = flot total

$$I_{\text{totale}} = \frac{P_{\text{cons(totale)}}}{U_{\text{secondaire répartiteur}}} = \frac{500}{U_{\text{secondaire répartiteur}}}$$

• La capacité minimale associée de chaque arc pour assurer le bon fonctionnement du réseau :

$$C_{(N_5 C_1)\text{min}} < 150 \text{ MW} ; C_{(N_5 C_2)\text{min}} < 100 \text{ MW} ;$$

$$C_{(N_5 C_3)\text{min}} < 250 \text{ MW} ;$$

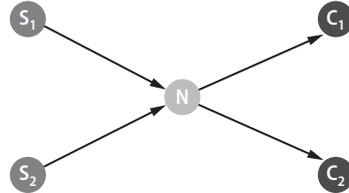
$$C_{(S_N_1)\text{min}} = C_{(N_1 N_2)\text{min}} = C_{(N_2 N_3)\text{min}} = C_{(N_3 N_4)\text{min}} = C_{(N_4 N_5)\text{min}} < 250 \text{ MW} = 150 \text{ MW} + 100 \text{ MW} + 250 \text{ MW.}$$

• L'arc où le coût qui résulte de pertes par effet Joule est le plus élevé correspond à celui dont la valeur de l'intensité est la plus élevée. Les arcs SN_1 , N_1N_2 , N_2N_3 , N_3N_4 modélisent des lignes électriques à haute tension puisqu'elles se situent entre deux transformateurs. Dans les arcs N_5C_1 , N_5C_2 et N_5C_3 , l'intensité totale est répartie. C'est donc dans l'arc N_1N_5 que la valeur de l'intensité du courant est la plus élevée (car la tension est

abaissée après les transformateurs et avant la répartition entre les cibles consommatrices), et c'est donc pour l'arc N_1N_5 que le coût qui résulte de l'effet Joule sera le plus élevé.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Modélisation (la plus simple) d'un réseau électrique constitué de deux centrales (S_1 et S_2) et deux villes (C_1 et C_2) à alimenter :



N est un nœud modélisant un répartiteur.

2. Les paramètres qui ont un impact sur le fonctionnement de ce réseau :

- la puissance consommée au niveau de chaque ville (impact sur le flot) ;
- la puissance produite au niveau de chaque centrale (impact sur le flot) ;
- la puissance maximale admissible dans chaque ligne électrique (impact sur la capacité de chaque arc) ;
- la puissance dissipée par effet Joule dans chaque ligne électrique (impact sur le flot et le coût).

p. 152 ■ ACTIVITÉ 4

Minimisation des pertes en ligne

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 destinatrices. »

Dans ce modèle, l'objectif est de minimiser les pertes par effet Joule sur l'ensemble du réseau sous les contraintes suivantes :

- 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. »

Savoir-faire : « Modéliser un réseau de distribution électrique simple par un graphe orienté. »

Exprimer mathématiquement les contraintes et la fonction à minimiser.

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. »

Le **document 1** explique aux élèves le principe du dispatching et de la nécessité d'optimiser constamment un réseau électrique.

Le **document 2** permet aux élèves d'identifier les contraintes d'un réseau électrique et leur montre comment en tenir compte dans l'étude de ce réseau.

Le **document 3** a pour objectif de définir la fonction à minimiser dans l'étude d'un réseau électrique.

Le **document 4** permet de mener une réflexion sur la minimisation des pertes en ligne per effet Joule dans un réseau simple en raisonnant avec un modèle mathématique adapté.

^{doc} 1 Pour mener une investigation

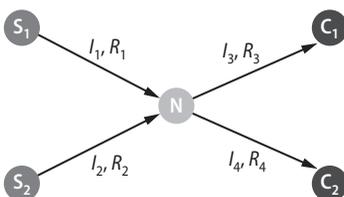
► Exemple de correction

- Dans un réseau électrique, il faut constamment ajuster la production d'électricité à la demande car l'électricité ne se stocke pas.
- On optimise la gestion du réseau électrique en se basant sur des prévisions de consommation et en cherchant à limiter les pertes par effet Joule.

^{doc} 2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Les résistances représentent la résistance des câbles électriques utilisés dans chaque arc.
- Représentation du réseau sous la forme d'un graphe orienté :



- Relation qui existe entre les intensités du courant électrique (loi des nœuds) : $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$.

- Inégalités qui traduisent les contraintes sur I_1 et I_2 en fonction d'autres grandeurs électriques connues :

$$I_1 \leq \frac{P_{1\max}}{U} \text{ et } I_2 \leq \frac{P_{2\max}}{U}.$$

- Comme $I_3 + I_4 = I_{\text{tot}}$ et $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$, on en déduit que $I_1 + I_2 = I_{\text{tot}}$ et donc que $I_2 = I_{\text{tot}} - I_1$.

Comme $I_2 \leq \frac{P_{2\max}}{U}$, on en déduit que :

$$I_{\text{tot}} - I_1 \leq \frac{P_{2\max}}{U}, \text{ donc que } I_{\text{tot}} - \frac{P_{2\max}}{U} \leq I_1.$$

Comme $I_1 \leq \frac{P_{1\max}}{U}$, on en déduit au final que :

$$I_{\text{tot}} - \frac{P_{2\max}}{U} \leq I_1 \leq \frac{P_{1\max}}{U}.$$

^{doc} 3 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- La société électrique peut minimiser le coût d'acheminement du transport de l'électricité au sein du réseau considéré en minimisant les pertes par effet Joule dues aux résistances des lignes électriques. La grandeur physique qu'il faudra chercher à minimiser est la puissance dissipée par effet Joule, qu'on peut appeler P_J .

$$P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

- Les termes relatifs à l'acheminement électrique des villes après le nœud sont : $R_3 \cdot I_3^2$ et $R_4 \cdot I_4^2$. Comme $I_3 + I_4 = I_1 + I_2 = I_{\text{tot}} = \text{constante}$ et que R_3 et R_4 sont constants, on en déduit que :

$$R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 = \text{constante} = C.$$

- On en déduit que : $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + C$ et donc que $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot (I_{\text{tot}} - I_1)^2 + C$.

P_J est bien une fonction qui est un polynôme du second degré en I_1 .

^{doc} 4 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Contraintes à prendre en compte pour le réseau étudié :

$$I_1 \leq I_{1\max} \text{ donc } I_1 \leq 5 \text{ A ; } I_2 \leq I_{2\max} \text{ donc } I_2 \leq 5 \text{ A.}$$

- Loi des nœuds : $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = 6 \text{ A}$.

On en déduit que $I_2 = 6 - I_1$, donc $6 - I_1 \leq 5$, donc $1 \leq I_1$.

D'où : $1 \text{ A} \leq I_1 \leq 5 \text{ A}$.

- Puissance dissipée par effet Joule dans le réseau : $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2$.

Vérifier ses connaissances

1 Questions à choix multiple

A- 1 et 2 ; la proposition 3 est fausse car on ne peut pas le négliger dans le transport de l'électricité (80 % des pertes, l'équivalent de deux unités de productions nucléaires, rien que pour la France).

B- 2 et 3 ; la proposition 1 est fausse : pour répondre à la demande de tous les utilisateurs, c'est la puissance électrique produite qui doit être importante, mais cela ne nécessite pas de transporter de l'électricité sous haute tension.

C- 1. La proposition 2 est fausse car un transformateur est modélisé par un nœud. La proposition 3 est fausse car le passage du courant est modélisé par une valeur écrite à côté de l'arc.

D- 1, 2 et 3.

E- 3. La proposition 1 est fausse car un centre de production est modélisé par une source. La proposition 2 est fausse car un transformateur est modélisé par un nœud.

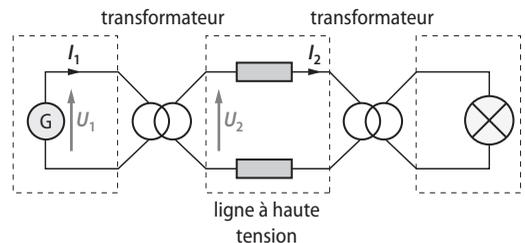
2 Restituer les notions essentielles du cours

1. Tout conducteur de l'électricité a tendance à s'échauffer au passage d'un courant électrique. Ce phénomène est appelé effet Joule. Il est un inconvénient dans le transport de l'électricité car il se traduit par une perte d'énergie.

2. On minimise l'effet Joule en augmentant la tension des lignes électriques ou en diminuant l'intensité du courant qui traverse un câble ou en utilisant des câbles dont le matériau ait une faible résistivité.

3 Appliquer le cours

1. a.



b. Les câbles électriques sont modélisés par des résistances car le matériau conducteur

Or $R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 = 1,8$, donc :

$$P_j = 0,1 \times I_1^2 + 0,2 \times (6 - I_1)^2 + 1,8$$

ou encore :

$$P_j = 0,1 \times I_1^2 + 0,2 \times (36 + I_1^2 - 12 \times I_1) + 1,8.$$

$$\text{Donc : } P_j = 0,3 \times I_1^2 - 2,4 \times I_1 + 9.$$

• Dérivée de P_j par rapport à I_1 :

$$\frac{dP_j}{dI_1} = 0,6 \times I_1 - 2,4.$$

$$\bullet \frac{dP_j}{dI_1} = 0 \text{ pour } 0,6 \times I_1 - 2,4 = 0 \text{ donc pour } I_1 = 4 \text{ A.}$$

Donc P_j admet un minimum pour une valeur de $I_1 = 4$ A.

• Ce minimum est une valeur possible de I_1 pour le réseau considéré dans lequel il faut que $1 \text{ A} \leq I_1 \leq 5 \text{ A}$.

• Donc pour minimiser les pertes par effets Joule dans le réseau étudié, il faudra que le panneau solaire 1 débite une intensité du courant d'une valeur de 4 A et le panneau solaire 2 une intensité du courant d'une valeur de 2 A.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Les contraintes générales d'un réseau électrique :

– la loi des nœuds : la valeur de la somme des intensités électriques qui arrivent à un nœud est égale à celle de la somme des intensités électriques qui en partent ;

– la valeur de l'intensité du courant débitée par une source est limitée par la valeur maximale de l'intensité du courant que peut débiter cette source (liée à sa puissance maximale qu'elle peut produire).

2. Dans un réseau électrique, on cherche à minimiser les pertes qui sont dues à l'effet Joule. La fonction que l'on cherche à minimiser traduit la puissance perdue par effet Joule dans l'ensemble du réseau. Elle nécessite de connaître pour chaque arc, la résistance des câbles et l'intensité du courant qui y circule.

3. Dans les cas d'un réseau constitué de deux sources débitant des intensités I_1 pour l'une et I_2 pour l'autre, d'un nœud et deux cibles, la fonction à minimiser est un polynôme du second degré en I_1 (ou I_2). On détermine le minimum de cette fonction en dérivant cette fonction par rapport à I_1 (ou I_2) et en déterminant une valeur de I_1 (ou I_2) qui annule cette dérivée.

Il convient ensuite de vérifier que cette dernière valeur est possible au vu des contraintes du réseau.

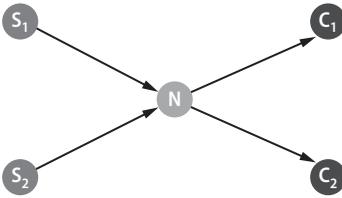
constituant ces câbles a une résistivité responsable de l'effet Joule.

2. a. Comme $P = U \cdot I$ et $U = R \cdot I$, on peut en déduire que $P = R \cdot I^2$.

b. D'après la relation $P = U \cdot I$, pour une même puissance transportée, le courant électrique circulant dans les câbles est plus faible lorsqu'on augmente la tension. Comme $P_j = R \cdot I^2$, la puissance dissipée par effet Joule diminue également.

4 Comprendre le cours

1. Graphe orienté :



2.

- Une source distributive modélise un lieu de production électrique (parc éolien, centrale nucléaire, etc.).
- Une cible destinatrice modélise un consommateur d'électricité (industries, habitations, etc.).
- Un nœud modélise un transformateur ou un répartiteur.
- Un arc modélise une ligne électrique.

5 Modéliser un réseau électrique

1. Ce type de représentation est appelé un graphe orienté.

2. La constitution possible du réseau électrique ainsi modélisé peut être la suivante : une source distributive qui peut être une centrale électrique (S), deux répartiteurs (N_1 et N_2) et deux cibles destinatrices (C_1 et C_2) qui peuvent être des habitations ou des industries.

6 Retour sur les problématiques

• Pourquoi est-on amené à transporter l'électricité à l'aide de lignes à haute tension ?

Tout conducteur de l'électricité a tendance à s'échauffer au passage d'un courant électrique. Ce phénomène est appelé l'effet Joule. L'énergie électrique est transportée depuis les centrales jusqu'aux habitations grâce à des câbles électriques. La résistance électrique d'un conducteur étant proportionnelle à sa longueur, ces câbles dissipent donc par effet Joule, à un instant donné, une puissance proportionnelle à leur longueur.

Cela conduit à des pertes inévitables durant le transport de l'énergie électrique. D'après la relation $P = U \cdot I$, pour une même puissance transportée, le courant électrique circulant dans les câbles est plus faible lorsqu'on augmente la tension. Comme $P_j = R \cdot I^2$, la puissance dissipée par effet Joule diminue également.

• Comment optimiser la distribution de l'électricité dans un réseau électrique ?

On cherchera à minimiser la valeur de l'intensité du courant dans une ligne électrique pour minimiser l'effet Joule et donc les pertes d'énergie en ligne.

Le transport de l'électricité se fait le plus souvent avec des lignes aériennes. Comme elles sont disgracieuses et impactent l'environnement et comme elles sont aussi vulnérables aux intempéries, on cherche de plus en plus à les enfuir. Cependant il est plus difficile de dissiper l'énergie thermique dû à l'effet Joule quand la ligne est enterrée. Il convient alors d'utiliser des matériaux dont la résistivité est plus faible (on privilégiera le cuivre à l'aluminium).

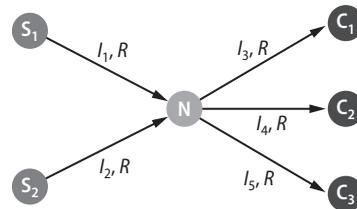
p. 158 ■

Exercice similaire

8 Gestion optimale d'un fournisseur d'électricité

1. Un fournisseur d'électricité possède un parc photovoltaïque (350 W) et un barrage hydraulique (200 MW) pour fournir trois villes. Il utilise à cet effet des lignes HT (63 000 V) et un distributeur qui centralise l'ensemble de l'électricité produite avant de la ventiler selon la demande.

Modélisation d'un réseau électrique décrit par un graphe orienté :



2. Si la demande d'électricité est telle qu'il faille produire 400 MW et que chaque ligne a la même résistance, si on veut minimiser autant que possible les pertes par effet Joule, il faut répartir cette production sur les deux lignes modélisées par les arcs S_1N et S_2N et donc sur les deux sources distributives :

- 200 MW pour le parc photovoltaïque ;
- 200 MW pour le barrage hydraulique.

Comme $U = 63\,000$ V, l'intensité à produire est de

$$I = \frac{P}{U} = \frac{400 \times 10^6}{63\,000} = 6,35 \text{ kA.}$$

3. La fonction à minimiser représente la puissance perdue par effet Joule dans le réseau étudié. Elle a pour expression :

$$P_J = \sum_{k=1}^5 R \cdot I_k^2 = R \cdot \sum_{k=1}^5 I_k^2.$$

p. 159 ■

S'entraîner

9 Enfouissement des câbles électriques

1. On cherche à enterrer les câbles haute tension car ils sont soumis aux aléas de la météo, et car ils sont disgracieux dans le paysage.

2. L'enfouissement est plus coûteux que pour les lignes aériennes car les matériaux utilisés sont plus chers, et car l'enfouissement nécessite de creuser des tranchées importantes.

3. Les câbles utilisés doivent être en cuivre car c'est un matériau qui est très bon conducteur de l'électricité et qui a donc une résistance au courant moins importante. Le cuivre permet de réduire les pertes par effets Joule que l'on cherche à minimiser d'autant plus que les câbles sont enterrés.

10 Estimation des pertes dans une ligne haute tension

1. Si le câble fait 100 km, sa résistance est égale à :
 $R = 6,0 \times 10^{-2} \times 100 = 6,0 \Omega.$

S'il est traversé par un courant électrique $I = 50 \text{ A}$, la puissance dissipée par effet Joule est égale à :
 $P_J = R \cdot I^2.$

Donc $P_J = 6,0 \times 50^2 = 15\,000 \text{ W} = 15 \text{ kW}.$

2. Si $P_J = 25 \text{ kW} = 25\,000 \text{ W}$,

$$R = \frac{P_J}{I^2} = \frac{25\,000}{50^2} = 10 \Omega.$$

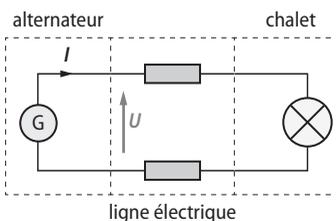
Ce qui revient à une longueur de fil égale à :

$$\frac{10}{6,0 \times 10^{-2}} = 170 \text{ km}.$$

11 Alimentation d'un chalet isolé

Questions préliminaires

1. Modélisation de la situation par un schéma électrique :



2. Quand tous les appareils électriques sont branchés, la puissance consommée est de 10 kW.

$$\text{Or } P = U \cdot I \text{ donc } I = \frac{P}{U} = \frac{10\,000}{230} = 43 \text{ A}.$$

Puissance dissipée par effet Joule dans la ligne :
 $P_J = R \cdot I^2;$

$$S = 15 \text{ cm}^2 = 15 \times 10^{-4} \text{ m}^2;$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \frac{1,7 \times 10^{-8} \times 10 \times 10^3}{20 \times 10^{-4}} = 0,113 \Omega.$$

$$\text{Donc } P_J = R \cdot I^2 = 0,113 \times 43^2 = 210 \text{ W}.$$

Problème à résoudre

La puissance au départ de la ligne doit donc être égale à $P = 10\,000 + 210 = 10\,210 \text{ W}.$

D'où la valeur que doit avoir la tension au départ de la ligne :

$$U = \frac{P}{I} = \frac{10\,210}{43} = 240 \text{ V}.$$

12 Rendement énergétique

1. L'énergie électrique dégradée par effet Joule est convertie en énergie thermique.

2. Expression de la puissance dissipée par effet Joule en fonction de l'intensité du courant électrique qui circule dans les câbles : $P_J = R \cdot I^2.$

3. a. Puissance électrique délivrée par le transformateur :

$$P_{\text{transformateur}} = U \cdot I = 400 \times 10^3 \times 50 = 20 \text{ MW}.$$

b. Puissance dissipée par effet Joule :

$$P_J = R \cdot I^2 = 200 \times 50^2 = 0,5 \text{ MW}.$$

c. Puissance électrique récupérée en bout de ligne :

$$P_{\text{bout}} = P_{\text{transformateur}} - P_J = 20 - 0,500 = 19,50 \text{ MW}.$$

$$\text{d. } r = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}} = \frac{19,50}{20} = 9,75 \ %.$$

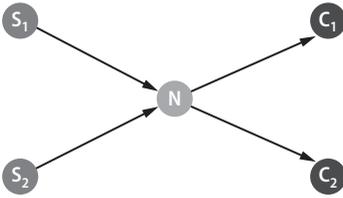
13 Un réseau électrique optimisé

1. Le réseau est adapté car les puissances totales que peuvent produire les générateurs sont plus élevées que les puissances totales consommées par les villes :

$$350 + 400 = 750 \text{ MW} > 450 + 200 = 650 \text{ MW}.$$

2. Pour déterminer l'intensité totale du courant qui circule dans le réseau, il faut connaître la tension utilisée puisque $I = \frac{P}{U}$ et prendre $P = 650 \text{ MW}.$

3. Modélisation d'un réseau électrique par un graphe orienté :



4. En utilisation optimale, comme les lignes électriques ont la même résistance, les deux générateurs doivent se répartir la puissance à produire (pour se répartir l'intensité à produire et donc limiter l'effet Joule dans les lignes électriques). Chaque générateur doit donc produire $\frac{650 \text{ MW}}{2} = 325 \text{ MW}$.

14 Fonction à minimiser

1. Contraintes sur I_1 et I_2 : $I_1 \leq I_{1\text{max}}$ et $I_2 \leq I_{2\text{max}}$.

Comme $I_3 + I_4 = I_{\text{tot}}$ et $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$ (loi des nœuds), on en déduit que $I_1 + I_2 = I_{\text{tot}}$ et donc que $I_2 = I_{\text{tot}} - I_1$.

Comme $I_2 \leq I_{2\text{max}}$ on en déduit que $I_{\text{tot}} - I_1 \leq I_{2\text{max}}$ donc que $I_{\text{tot}} - I_{2\text{max}} \leq I_1$.

Comme $I_1 \leq I_{1\text{max}}$ on en déduit au final que :

$$I_{\text{tot}} - I_{2\text{max}} \leq I_1 \leq I_{1\text{max}}$$

2. La grandeur physique qu'il faudra chercher à minimiser est la puissance dissipée par effet Joule P_J :

$$P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

On en déduit que : $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot (I_{\text{tot}} - I_1)^2 + C$

P_J est bien une fonction qui est un polynôme du second degré en I_1 .

15 Modèles pour décrire un réseau électrique

A. Modèle physique

1. a. Le courant qui transite par ce réseau est limité ici par la demande. En effet :

$$P_{\text{habitations}} + P_{\text{industries}} < P_{\text{centrales}}$$

soit $250 \text{ MW} + 150 \text{ MW} = 400 \text{ MW} < 500 \text{ MW}$.

Autre contrainte de ce réseau : pour le courant au niveau du répartiteur, on doit avoir :

$$\sum I_{\text{entrant}} = \sum I_{\text{sortant}}$$

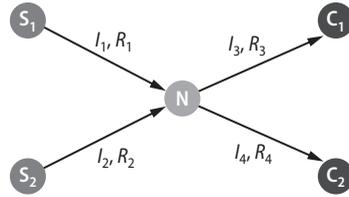
b. Si l'électricité est transportée par des lignes haute tension à 63 000 V, on peut en déduire la valeur de l'intensité totale qui doit arriver aux cibles consommatrices :

$$I = \frac{P_{\text{habitations}} + P_{\text{industries}}}{U} = \frac{400 \times 10^6}{63\,000} = 6,35 \text{ kA}.$$

2. La grandeur dont on cherche à minimiser la valeur est la puissance dissipée par effet Joule.

B. Modèle mathématique

1. Modélisation du réseau électrique par un graphe orienté :



2. La fonction à minimiser peut s'écrire :

$$P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

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

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = I_{\text{tot}}$$

Comme R_3 et R_4 sont constants, on peut écrire :

$$R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 = \text{constante} = D.$$

On en déduit que $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + D$ et donc que $P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot (I_{\text{tot}} - I_1)^2 + D$

Donc $P_J = A \cdot I_1^2 + B \cdot (C - I_1)^2 + D$ avec :

$$A = R_1 ; B = R_2 ; C = I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = I_{\text{tot}} ;$$

$$\text{et } D = R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

16 Optimisation d'un réseau

1. Contraintes à prendre en compte pour le réseau étudié :

$$I_1 \leq I_{1\text{max}} \text{ donc } I_1 \leq 5 \text{ A} ; I_2 \leq I_{2\text{max}} \text{ donc } I_2 \leq 4 \text{ A}.$$

Loi des nœuds : $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = 6 \text{ A}$.

On en déduit que $I_2 = 6 - I_1$ donc $6 - I_1 \leq 4$ donc $2 \leq I_1$.

Donc : $2 \text{ A} \leq I_1 \leq 5 \text{ A}$.

2. a. Puissance dissipée par effet Joule dans le réseau :

$$F = P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

$$\text{b. } R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 = 0,2 \times 42 + 0,2 \times 22 = 4.$$

$$\text{Donc } F = P_J = 0,2 \times I_1^2 + 0,05 \times (6 - I_1)^2 + 4.$$

ou encore :

$$F = P_J = 0,2 \times I_1^2 + 0,05 \times (36 + I_1^2 - 12 \times I_1) + 4.$$

$$\text{Donc } F = P_J = 0,25 \times I_1^2 - 0,6 \times I_1 + 5,8.$$

3. a. Dérivée de P_J par rapport à I_1 :

$$\frac{dP_J}{dI_1} = 0,5 \times I_1 - 0,6.$$

$$\frac{dP_J}{dI_1} = 0 \text{ pour } 0,5 \times I_1 - 0,6 = 0$$

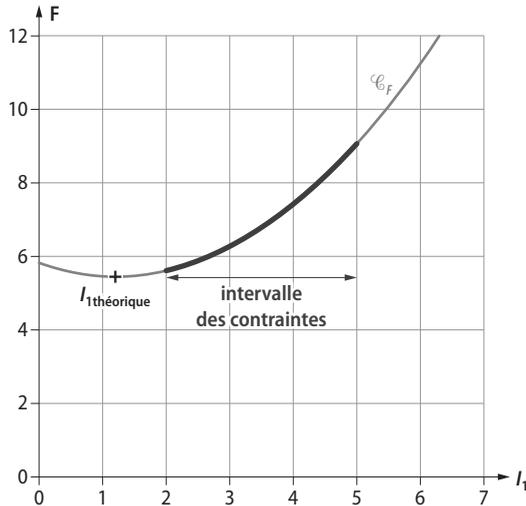
donc pour $I_{1\text{théorique}} = 1,2 \text{ A}$.

Donc P_j admet un minimum pour une valeur $I_{1\text{théorique}} = 1,2 \text{ A}$.

b. Ce minimum n'est pas une valeur possible de I_1 pour le réseau considéré pour lequel il faut : $2 \text{ A} \leq I_1 \leq 5 \text{ A}$.

c. Comme la fonction F est croissante sur l'intervalle $[2 ; 5]$ ($F(2) < F(5)$), la fonction est minimale pour $I_1 = 2 \text{ A}$.

4.



17 Préparation BAC Enjeux du transport de l'électricité

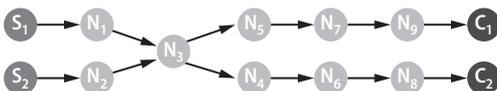
1. a. On transporte l'électricité sous haute tension pour éviter les pertes par effet Joule.

b. D'après la relation $P = U \cdot I$, pour une même puissance transportée, le courant électrique circulant dans les câbles est plus faible lorsqu'on augmente la tension. Comme $P_j = R \cdot I^2$, la puissance dissipée par effet Joule diminue également.

c. D'après le document 1, la densité maximale du courant est égale à $0,8 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ et le diamètre du câble est de 9 cm , donc la valeur maximale de l'intensité est :

$$I_{\text{max}} = 0,8 \times 2 \times \pi \times 90^2 = 40 \text{ kA}.$$

2. a. Modélisation du réseau électrique par un graphe orienté :



b. En sortie du réseau, on a une ville (C_1) et des industries (C_2). D'après le document 3, une ville

consomme 500 MW d'électricité. Les industries consomment autant que les particuliers. Donc la demande totale est égale à :

$$P_{\text{demande totale}} = 2 \times 500 \text{ MW} = 1\,000 \text{ MW}.$$

Pour les lignes haute tension : $U = 63\,000 \text{ V}$.

$$\text{Comme } P_{\text{demande totale}} = U \cdot I_{\text{demande totale}}$$

$$I_{\text{demande totale}} = \frac{P_{\text{demande totale}}}{U} = \frac{1\,000 \times 10^6}{63\,000} = 16 \text{ kA}.$$

Le flot, qui correspond à la valeur de l'intensité du courant en sortie du réseau est donc égale à $f_{\text{sortant}} = 16 \text{ kA}$.

La consommation étant égale pour la ville et les industries, on peut écrire :

$$f(N_7 C_1) = f(N_8 C_2) = \frac{f_{\text{sortant}}}{2} = 8 \text{ kA}.$$

3. • D'après le document 2, dans un réseau de transport d'électricité, les pertes sont estimées en moyenne à $2,5 \%$ de la consommation globale. Pour compenser ces pertes, le flot entrant dans le réseau, le flot entrant et le flot sortant doivent être reliés par l'égalité suivante :

$$\left(1 - \frac{2,5}{100}\right) \times f_{\text{entrant}} = \left(\frac{97,5}{100}\right) \times f_{\text{entrant}} = 0,975 \times f_{\text{entrant}} = f_{\text{sortant}} = 16 \text{ kA}.$$

$$\text{Donc } f_{\text{entrant}} = \frac{16}{0,975} = 16,4 \text{ kA}.$$

On en déduit la puissance que devra fournir à la fois la centrale nucléaire et le barrage hydraulique :

$$P_{\text{fournie totale}} = U \cdot I_{\text{fournie totale}} = 63\,000 \times 16,4 \times 10^3 = 1\,033 \text{ MW}.$$

• Pour minimiser les pertes par effet Joule, ce flot doit être réparti au mieux dans les arcs $S_1 N_1$ et $S_2 N_2$.

D'après le document 3, un réacteur d'une centrale nucléaire peut produire une puissance de 900 MW , soit quatre fois plus qu'un barrage hydraulique performant.

Ce qui signifie que $P_{\text{max centrale}} = 900 \text{ MW}$ et que

$$P_{\text{max barrage}} = \frac{P_{\text{max centrale}}}{4} = \frac{900}{4} = 225 \text{ MW}.$$

Donc on optimisera avec les puissances produites suivantes :

– au niveau du barrage hydraulique :

$$P_{\text{barrage}} = P_{\text{max barrage}} = 225 \text{ MW} ;$$

– au niveau de la centrale nucléaire :

$$P_{\text{centrale}} = P_{\text{fournie totale}} - P_{\text{barrage}} = 1\,033 - 225 = 808 \text{ MW}.$$

Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

LE PROGRAMME

2. Le futur des énergies

2.4 – Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

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
<p>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.</p> <p>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).</p> <p>Les durées longues, liées à l'inertie de certains systèmes (infrastructures énergétiques, transports, production industrielle), sont à confronter à l'urgence de l'action.</p> <p>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>	<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>
Prérequis et limites	
<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>	

► SITUATION 1

Cette situation permet de revenir sur les notions de scénarios climatiques rencontrés au chapitre 3 de la partie 1.

► Exemple de réponse attendue

Les modèles qui s'accordent à prévoir les changements climatiques sont assortis d'hypothèses portant sur l'évolution de la production des gaz à effet de serre.

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

L'activité 4 permettra de sensibiliser les élèves aux comportements qu'il est indispensable de mettre en place, au niveau d'un territoire, pour lutter contre le changement climatique.

► SITUATION 2

Cette situation permet de revenir sur la notion de risques naturels étudiée au collège et en classe de Seconde (SVT) et que l'actualité récente a fortement médiatisée.

► Exemple de réponse attendue

Cyclones, inondations, sécheresses, canicules, feux de forêts sont des risques naturels qui se multiplient avec le changement climatique entraînant la vulnérabilité des populations.

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

L'activité 1 permettra de débattre de l'enjeu du nucléaire et d'aborder les différents points de vue qu'il engendre.

► SITUATION 3

Cette situation permet de revenir sur les notions d'énergies primaires disponibles sous forme de stocks ou de flux, étudiées au chapitre 4 de la partie 1.

► Exemple de réponse attendue

Une énergie renouvelable provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

L'activité 2 permettra d'étudier dans quelle mesure les énergies renouvelables réduisent la production de CO₂, le principal GES.

Dans l'activité 3, les élèves découvriront l'intérêt du biométhane.

On aborde dans ce chapitre les différents impacts que peuvent avoir les choix énergétiques sur les sociétés.

L'**activité 1** permet de se rendre compte que pour débattre collectivement sur un sujet donné, ici le nucléaire, les citoyens doivent être suffisamment informés.

L'intérêt de développer les énergies renouvelables est abordé dans l'**activité 2** et un focus est fait sur le biogaz dans l'**activité 3**.

L'**activité 4** présente quant à elle différents leviers sur lesquels il est possible d'agir au niveau local pour réduire les dépenses énergétiques.

Le nucléaire en question

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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). »

Savoir-faire : « Analyser d'un point de vue global les impacts de choix énergétiques majeurs : exemple du nucléaire. »

Le **document 1** compare les prix de l'électricité et la part du nucléaire dans le mix énergétique en Europe.

Le **document 2** présente le mix électrique français (en puissance installée) et un document du GIEC qui rappelle les émissions équivalentes en CO₂ des différentes sources d'énergie électrique.

Le **document 3** est une enquête réalisée chaque année à la demande d'EDF.

doc

1 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- L'électricité française, la plus dépendante du nucléaire, est 22 % plus compétitive que la moyenne de l'Union européenne pour les ménages et 19 % pour les industriels.

- Avec peu d'émission de CO₂, l'intensité carbone de l'économie française est inférieure à la

moyenne européenne. De plus, ces prix sont un atout pour les entreprises françaises dans la compétition internationale et pour le pouvoir d'achat des français.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. L'énergie nucléaire fournit une électricité dont l'impact sur le climat est très faible, comparable voire meilleur au kWh produit, à l'éolien, au solaire ou à l'hydraulique.

2. Une des caractéristiques principales du système électrique français est qu'il est « décarboné » à près de 90 %.

Oui, son évolution va dans le bon sens puisque la part du thermique à combustible fossile diminue et que celle des énergies renouvelables augmente.

3. Si l'on additionne les « beaucoup » (44 %) et les « un peu » (34 %), on frôle les 80 % des sondés attribuant aux centrales nucléaires une responsabilité dans l'élévation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre, et donc dans le changement climatique.

L'analyse du détail par tranche de population fait percevoir une dégradation de la culture scientifique inversement proportionnelle à l'âge. Entre 18 et 24 ans, 63 % de la population est persuadée du caractère climaticide des centrales nucléaires. Plus on est jeune et plus on se trompe !

4. 75 % des sondés se déclarant « tout à fait contre » l'utilisation du nucléaire croient que les centrales nucléaires contribuent « beaucoup » à l'effet de serre. Si l'on croit que l'énergie nucléaire, c'est mauvais, alors il faut qu'elle soit mauvaise aussi pour le climat que l'on veut préserver.

La seule option de politique énergétique qui rassemble des personnes majoritairement informées de la véritable liaison entre nucléaire et climat est celle qui se déclare « tout à fait pour » cette source d'électricité.

p. 166 ■ **ACTIVITÉ 2**

Le développement des énergies renouvelables

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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). »

Savoir-faire : « Dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés. »

Le **document 1** présente l'intérêt des énergies renouvelables quant aux émissions équivalentes en CO₂ pour les différentes sources d'énergie électrique.

Le **document 2** décrit un scénario d'EDF sur l'utilisation massive des énergies renouvelables pour produire notre électricité.

Le **document 3** compare la notion d'intermittence pour les différentes sources d'énergie électrique et le **document 4** explique qu'il existe des alternatives au problème d'intermittence que présentent les énergies renouvelables.



2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Au total, avec 700 GW de solaire et d'éolien, le scénario d'EDF diminue de 100 GW la puissance totale des centrales thermiques nécessaires.
- C'est la diminution du parc européen de centrales à charbon, à gaz ou à biomasse qui conduit à cette baisse des émissions de CO₂.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. En termes d'émissions de GES, l'éolien est en dessous du solaire, et très en dessous du gaz ou du charbon.

2. Les taux de charge de l'éolien et du solaire tournent autour de 20 % et 10 %, bien inférieurs à ceux du charbon et du gaz (40 %) et surtout à celui du nucléaire (80 %).

3. Le développement des énergies renouvelables peut s'accompagner de celui d'énergies plus polluantes en raison de leur intermittence. En effet, quand les énergies renouvelables ne tournent pas, elles sont compensées par des énergies carbonées (centrales thermiques au gaz ou au charbon), qui sont susceptibles d'augmenter les émissions de CO₂.

Il existe des alternatives telles les centrales hydroélectriques, les centrales au gaz renouvelable ou le stockage de l'énergie *via* les piles à combustible par exemple.

Une source d'énergie en devenir : le biométhane

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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). »

Savoir-faire : « Dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés. »

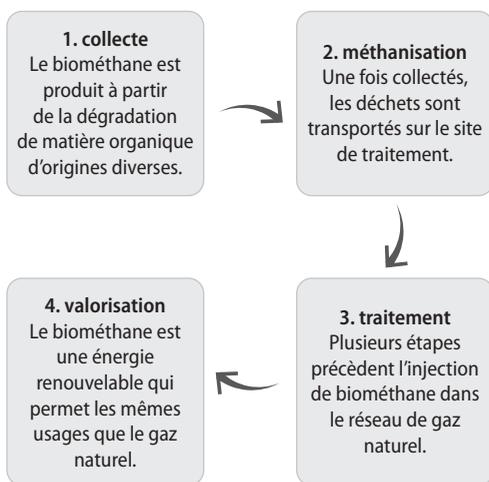
Le **document 1** décrit le développement du biométhane dans le mix énergétique français, le **document 2** explique le procédé de méthanisation tandis que le **document 3** montre comment ce procédé devrait devenir rentable dans le futur.



2 Pour mener une investigation

Exemple de correction

- L'intérêt d'odoriser le gaz distribué dans les réseaux est de permettre la détection d'une éventuelle fuite dans le réseau grâce à l'odeur émise.
- Les quatre étapes du processus de méthanisation sont décrites dans le schéma ci-après :



Exemple de correction des pistes de travail

1. Outre qu'il entraînerait une réduction d'émissions de gaz à effet de serre, le développement

du gaz « vert » en France s'accompagnera d'une série d'effets bénéfiques :

- une amélioration de la balance commerciale de la France ;
- une augmentation de l'indépendance énergétique du pays ;
- une baisse des déchets et des pollutions du monde agricole ;
- le développement d'une économie locale ; c'est toute une chaîne qui se met en place autour du gaz vert, favorable à l'emploi et à l'aménagement du territoire ;
- le développement d'une agriculture durable car il génère un coproduit appelé digestat, engrais organique naturel qui se substitue aux engrais chimiques.

2. L'objectif d'une production de biogaz représentant 7 % de la consommation de gaz en 2030 est réaliste car le nombre de projets est en forte augmentation, d'où la forte croissance de l'injection dans le réseau de distribution (document 1 b). De plus, de nouveaux procédés de production sont en train de se développer.

3. Pour assurer la compétitivité « macroéconomique » du biogaz par rapport au gaz naturel à l'horizon de 2030, il faudra une augmentation des volumes (elle viendra avec la standardisation des procédés) et une réduction des coûts de production. De plus, actuellement un producteur est assuré de vendre, à un tarif fixé par arrêté, le biométhane produit par son installation à un fournisseur de gaz naturel. Ce sont donc les clients du gaz naturel qui le subventionnent.

4. Hormis le problème économique, le problème des ressources en biomasse pourrait gêner son développement, et il faudrait ajouter des cultures allouées à cet effet.

Maîtriser l'énergie à l'échelle locale

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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). »

Savoir-faire : « Dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés. »

Le **document 1** présente ce qu'est un plan climat-air-énergie territorial et les **documents 2, 3 et 4** détaillent des exemples de mesures prises par les collectivités locales pour lutter contre le changement climatique.

DOC

4 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• Les matériaux biosourcés sont le bois, le liège, le cuir, la paille. Ils offrent deux avantages : une économie d'énergie, en raison d'une amélioration thermique considérable, et une construction plus saine car les matières biosourcées sont souvent moins nocives pour la santé. Par exemple, le bois est perméable à la vapeur d'eau, il laisse le bâtiment respirer et prévient la formation de moisissures.

• Pour produire plus d'énergie qu'il n'en consomme, un bâtiment peut utiliser des ressources renouvelables : solaire, thermique et photovoltaïque.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Des mesures pour répondre à chacun des 3 objectifs d'un plan climat-air-énergie territorial sont par exemple :

– pour améliorer l'efficacité énergétique : favoriser les apports d'énergie gratuits en orientant les bâtiments ou en choisissant une bonne disposition des fenêtres, imposer des performances énergétiques renforcées pour les bâtiments neufs ;

– pour augmenter la part des énergies renouvelables dans le fonctionnement du territoire : installer des chauffe-eaux solaires ;

– pour réduire l'impact des activités en termes d'émissions de gaz à effet de serre : développer les visio-conférences pour éviter des déplacements, limiter le nombre de places de stationnement automobile dans leurs locaux.

2. Les intérêts de la valorisation de l'incinération des déchets pour une collectivité sont la réduction de la part de l'énergie fossile consommée, remplacées par l'incinération des déchets et la réduction des coûts pour les utilisateurs du réseau.

3. Les exemples de rénovation énergétique du document 3 permettent de réduire l'impact carbone de la collectivité :

– le remplacement des menuiseries, la pose d'un sas d'entrée ou l'ajout d'une isolation par l'extérieur réduisent la déperdition d'énergie, grâce à une bonne étanchéité à l'air du bâtiment ;

– le remplacement des chaudières au fioul, l'installation d'un éclairage LED à détection de présence, le déploiement de sondes de températures dans les bâtiments ou l'installation d'un film solaire sur une verrière favorisent les équipements économes en énergie pour le chauffage, l'éclairage ou le rafraîchissement.

CORRECTION DES EXERCICES

p. 175 ■

Vérifier ses connaissances

1 Questions à choix multiple

A- 1 et 3 ; la proposition 2 est fautive car il faut au contraire augmenter notre consommation d'énergies renouvelables.

B- 1 ; les propositions 2 et 3 sont fausses car le temps presse pour éviter la catastrophe.

C- 1, 2 et 3

D- 1, 2 et 3

E. 2 ; la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car la part du nucléaire est très importante en France ; la proposition 3 est également fautive car la part du nucléaire est très importante en France.

2 Analyser des éléments de décision

Dans l'ordre des lignes : fossile, nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire.

3 Retour sur les problématiques

• **Quels sont les choix énergétiques de la France pour limiter le réchauffement climatique ?**

Diversifier le mix énergétique en augmentant la part des énergies renouvelables, aller vers des véhicules zéro émission, accélérer la rénovation énergétique des bâtiments, etc.

• **Quels sont les paramètres à prendre en compte pour effectuer des choix ?**

Facteurs économiques, sociaux, environnementaux, etc.

• **Quelles pistes peut-on développer pour aller plus loin ?**

Changer nos modes de mobilité, recycler pour moins gaspiller, etc.

4 Agir pour la transition écologique

Une start-up a réussi l'exploit de créer un carburant alternatif très performant en convertissant des ressources renouvelables (des sucres résiduels de l'industrie de la betterave). Rien à voir

avec les biocarburants disponibles depuis longtemps, qu'il fallait incorporer à 10 ou 15 % dans de l'essence. Il s'agit cette fois d'un biokérozène possédant les mêmes qualités que celui issu du pétrole. La première usine de production devrait entrer en service à la fin de l'année 2021.

p. 176 ■

Exercice similaire

6 Le paysage énergétique outre-Rhin

1. Le facteur 10 sur le taux d'émission de CO₂ par kWh entre la France et l'Allemagne est lié au fait que l'Allemagne continue à produire une grande part de son électricité à partir du charbon et du gaz.
2. Les énergies renouvelables représentant 30 % de l'électricité allemande. Les émissions allemandes seraient encore plus élevées sans cette forte proportion d'énergie renouvelable dans le mix.
3. C'est le rejet du nucléaire par les populations qui redoutent les impacts sur la santé et l'environnement ainsi que les risques en cas d'accident.

p. 177 ■

S'entraîner

7 Nouveaux comportements

1. Les trois énergies renouvelables qui pourraient être les plus concernées par des projets énergétiques citoyens sont le solaire, l'éolien et la biomasse.
2. De telles initiatives sont proposées par « les Survoltés d'Aubais » (Gard) dont l'objectif est de monter un parc solaire afin de garantir l'intérêt collectif en assurant des retombées économiques et sociales locales. Le financement est assuré sans recours aux banques avec des subventions de la région et de l'argent investis par les citoyens.
Ou encore « Centrales Villageoises », dont l'objectif est de développer significativement les énergies renouvelables sur un groupement de communes, qui ont choisi ensemble de participer à cette démarche. Les projets de Centrales Villageoises s'intègrent dans les objectifs du territoire et répondent à ses enjeux propres (énergétiques, paysagers, économiques...).

8 Énergies renouvelables

1. a. Les énergies renouvelables sont toutes issues de sources non fossiles renouvelables. Ces énergies sont théoriquement inépuisables.
b. Elles ont un impact limité sur l'environnement. En particulier, elles ne donnent pas lieu à de grandes émissions de gaz à effet de serre, et sont donc l'un des facteurs de lutte contre le changement climatique.
2. a. Les énergies renouvelables offrent une alternative aux hydrocarbures dont la fin est programmée.
b. Elles offrent une alternative à l'énergie nucléaire dont la prolifération est inquiétante aux yeux du public.
3. Les énergies renouvelables ne changeront pas le paysage énergétique mondial. Même le scénario le plus optimiste (établi par les experts de Greenpeace) prévoit que seul un tiers de la consommation énergétique de 2030 proviendra des énergies renouvelables et que les énergies fossiles continueront à fournir plus des deux tiers de la consommation mondiale.
4. Ces études démontrent que l'essentiel du débat doit porter sur les capacités à économiser l'énergie.
5. Le plafond de production des énergies vertes doit augmenter si l'innovation vient à leur secours car elles possèdent un fort potentiel.

9 Taux de charge

1. Pour avoir la garantie d'un taux de charge suffisant, il faut que l'éolienne soit placée dans un endroit venteux et en hauteur.
2. 1 an = 8 760 heures.
Cette éolienne pourrait, en théorie, produire au maximum :
$$E = P \cdot t = 2,00 \times 8\,760 = 17,5 \times 10^3 \text{ MWh}$$
$$E = 17,5 \text{ GWh.}$$
Le taux de charge de cette éolienne est donc de $\frac{4,00}{17,5} = 22,8 \%$.
3. Elle a tourné à sa puissance nominale pendant :
$$t = \frac{E}{P} = \frac{4,00 \times 10^3}{2,00} = 2,00 \times 10^3 \text{ heures.}$$
4. En réalité, les éoliennes fonctionnent à différents régimes.

10 Des territoires à énergie positive

1. et 2. Un territoire à énergie positive doit favoriser :
– l'efficacité énergétique (par exemple, grâce à la construction de bâtiments bien isolés) ;

– la réduction des émissions de gaz à effet de serre (par exemple, par le déploiement de transports en commun) ;

– la diminution de la consommation des énergies fossiles (par exemple, par le déploiement d'énergies renouvelables comme l'installation d'éolienne et de panneaux photovoltaïques).

11 Regard critique sur le nucléaire

1. Le cycle de vie du nucléaire, de l'extraction de l'uranium à sa fabrication en combustible, en passant par la manipulation et le transfert de matières radioactives, est émetteur de gaz à effet de serre. Donc l'énergie nucléaire n'est pas 100 % décarbonée. L'uranium est un minerai qui est une ressource fossile aussi limitée que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, donc l'énergie nucléaire n'est pas renouvelable.

2. Le risque cible l'émission brutale dans l'atmosphère de produits radioactifs, nocifs pour la population et l'environnement.

3. En cas de rejets radioactifs importants, les populations seront évacuées dans une zone de 10 km. En cas de rejet de faible intensité, les populations seront confinées chez elles et doivent ingérer de l'iode stable.

4. Les mesures réalisées dans la centrale du Tricastin n'ont pas atteint le seuil d'investigation car l'intensité des vibrations sismiques enregistrées a été 22 fois moins importante que le niveau de vibration pris en compte lors des études à la conception de la centrale.

12 Le cas du Japon

1. La consommation d'électricité du Japon entre 1990 et 2013 a augmenté (+ 24 % en 23 ans).

2. Cette évolution ne peut pas s'expliquer par l'augmentation de la population car depuis 2010, elle baisse. L'explication est donc la hausse de la consommation par habitant, due à des besoins toujours plus énergivores. En effet, d'après

différents économistes, l'accident nucléaire de Fukushima (qui a juste changé le mix) n'a pas significativement infléchi la tendance sur la consommation globale.

3. Ce n'est pas surprenant pour un pays comme le Japon dont l'économie est très développée et connectée.

4. On peut constater une énorme baisse de la part du nucléaire, qui a été compensée essentiellement par l'augmentation de la part des énergies fossiles. La cause en est l'accident nucléaire de Fukushima.

5. Cela pose à la fois des problèmes de dépendance énergétique vis-à-vis des importations mais aussi de pollutions dues à l'utilisation massive des énergies fossiles.

13 Prépa BAC La sortie du nucléaire de l'Allemagne

1. a. L'arrêt du nucléaire a été compensé par une augmentation du recours au charbon et une accélération de l'utilisation des énergies renouvelables.

b. L'arrêt du nucléaire a ralenti la réduction des émissions de CO₂ outre-Rhin (document 1). Elles ont légèrement augmenté en 2012 et 2013 avant de diminuer à nouveau ces dernières années. En 2018, l'Allemagne a baissé ses émissions de 30,8 % par rapport à 1990.

2. Les émissions allemandes seraient encore plus élevées sans les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Le document 3 tend à prouver que l'on peut dénucléariser et décarboner (lentement) en même temps. En 2018, 183,7 millions de tonnes d'équivalent CO₂ ont été évitées.

3. L'Allemagne court des risques en matière de sécurité d'approvisionnement dans l'avenir. En effet, la part du charbon et de la lignite est encore de 35,4 % soit autant que les ENR en 2018 (document 2), et il faudra la compenser en important de l'électricité.

Vers l'évaluation commune

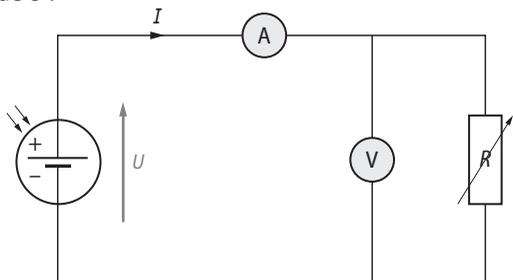
Manuel p. 180

CORRECTION DES EXERCICES

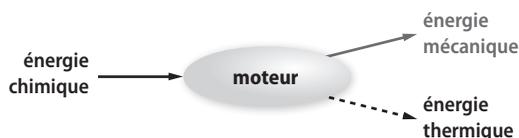
2 Panneaux solaires pour véhicules hybrides

1. L'avantage d'un véhicule hybride avec panneaux solaires est l'utilisation en partie de l'énergie solaire qui est une énergie renouvelable ne produisant pas de dioxyde de carbone. L'inconvénient est qu'un véhicule hybride utilise encore essentiellement de l'énergie thermique et produit du dioxyde de carbone.

2. Montage expérimental qui permet de retrouver la caractéristique du courant I en fonction de la tension U et donc la puissance P ($P = U \cdot I$) en fonction de U :



3. • Chaîne énergétique traduisant les énergies mises en jeu au niveau du moteur :



• Chaîne énergétique traduisant les énergies mises en jeu au niveau des panneaux solaires :



4. D'après le document 1, dans les conditions de mesures, la puissance maximale du panneau est $P_{\max} = 230 \text{ W}$.

Dans les conditions de mesure, la puissance surfacique du rayonnement était de $580 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. La surface des panneaux photovoltaïques était de $2,5 \text{ m}^2$, on en déduit que la puissance reçue par rayonnement est $P_{\text{reçue}} = 2,5 \times 580 = 1\,450 \text{ W}$.

Donc le rendement est :

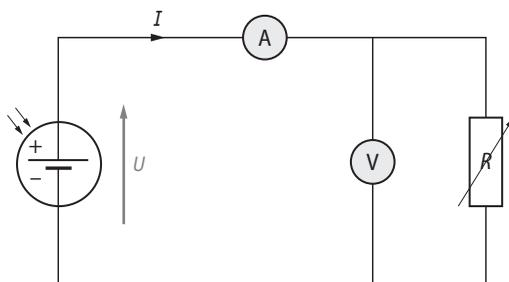
$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{230}{1\,450} = 0,16 = 16 \%$$

On retrouve la valeur du rendement donnée par le constructeur.

3 Productions autonomes d'électricité

► Partie 1. Irriguer avec l'énergie solaire

1. Montage expérimental qui permet de retrouver la caractéristique du courant I en fonction de la tension U :



2. a. Pour $E = 800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et une température de 45°C , la puissance maximale $P_{\text{m th}}$ que peut fournir la cellule correspond au point B de la caractéristique.

On a donc $I = 3,0 \text{ A}$ et $U = 14 \text{ V}$

$$P_{\text{m th}} = 42 \text{ W}$$

b. On a $P_{\text{m th}} = P_{\text{m r}} = 42 \text{ W}$.

c. Ce rendement est faible car une cellule photovoltaïque ne peut pas réagir à la totalité du spectre lumineux.

3. La puissance consommée par le moteur électrique est : $P_e = 1\,200\text{ W}$.

Pour une cellule on a : $P_m = 42\text{ W}$.

On en déduit que $n_{\text{cell}} = \frac{1200}{42} = 29$ cellules.

4. Deux avantages que procurerait son remplacement par le panneau photovoltaïque :

- éviter les rejets de gaz à effet de serre résultant de la combustion de l'essence ;
- être autonome au niveau de la ressource énergétique.

► Partie 2. S'éclairer avec la gravité

1.



2. a. $E_p = m \cdot g \cdot h = 12 \times 10 \times 2 = 240\text{ J}$.

b. On estime la vitesse du sac :

$$v = \frac{2}{15 \times 60} = 2,2 \times 10^{-3}\text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \times 12 \times (2,2 \times 10^{-3})^2 = 2,9 \times 10^{-5}\text{ J}.$$

Donc seule une fraction négligeable de l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique.

c. La puissance mécanique moyenne récupérable pendant la chute est :

$$P_m = \frac{E_p}{\Delta t} = \frac{240}{15 \times 60} = 0,27\text{ W}.$$

3. a. Le générateur électrique de la lampe à gravité est un alternateur (une dynamo) qui est constitué d'un aimant et d'une bobine de cuivre (le mouvement de l'un par rapport à l'autre produit de l'électricité).

b. D'après le document 2, le générateur fournit une puissance $P_{\text{elec}} = U \cdot I = 2,6 \times 0,070 = 0,18\text{ W}$.

On en déduit le rendement :

$$\mu = \frac{P_{\text{elec}}}{P_m} = \frac{0,18}{0,27} = 67\%.$$

4 Analyse de l'architecture d'un réseau électrique

► Partie 1. Production de l'électricité

1. a. Les principaux moyens de production d'électricité en France actuellement sont : le nucléaire, l'hydraulique, le thermique à combustible fossile, l'éolien, les bioénergies et le solaire.

b. Le moyen le plus utilisé est le nucléaire.

Sa part (en %) dans la production totale est égale à :

$$\mu = \frac{E_{\text{nucléaire}}}{\Sigma E} = \frac{416,8}{416,8 + 58,7 + 34,1 + 21,1 + 7,9 + 7,4}$$

$$\mu = \frac{416,8}{546}$$

$$\mu = 0,76 = 76\%.$$

L'avantage du nucléaire est qu'il ne produit pas de gaz à effet de serre. L'inconvénient est qu'il produit des déchets nucléaires que l'on ne sait pas pleinement traités.

c. En cas de surproduction d'électricité sur le territoire français, il est possible d'exporter l'électricité produite en surplus.

2. a. Excepté pour le solaire, une centrale électrique fonctionne avec une turbine qu'il s'agit de faire tourner afin qu'elle entraîne avec elle un alternateur constitué d'un aimant et de bobines de cuivre (le mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre produit de l'électricité).

b. Dans le cas du solaire, l'énergie électrique est produite à l'aide d'une partie de la lumière issue du Soleil. Les photons dont l'énergie est supérieure au GAP du semi-conducteur qui constitue la cellule photovoltaïque permettent l'émission d'électrons (et donc un courant électrique).

► Partie 2. Transport de l'électricité

1. La principale limitation technologique expliquant que l'on doit garantir à tout instant un équilibre entre production et consommation d'électricité est qu'il reste difficile de pouvoir stoker de l'électricité notamment à grande échelle.

2. a. Le nom des pertes que l'on minimise en transportant l'électricité sous haute tension est « pertes par effet Joule ». Ces pertes sont dues à l'échauffement de tout conducteur traversé par un courant électrique.

b. Le dispositif qui permet d'augmenter la tension est le transformateur.

D'après la relation $P = U \cdot I$, pour une même puissance transportée, le courant électrique circulant dans les câbles est plus faible lorsqu'on augmente la tension. Comme $P_j = R \cdot I^2$, la puissance dissipée par effet Joule diminue également.

3. a. • Courant de ligne I_1 pour $U_1 = 400\text{ kV}$:

$$P = U \cdot I \text{ donc } I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{100 \times 10^6}{400\,000} = 250\text{ A}.$$

- Courant de ligne I_2 pour $U_2 = 400$ kV :

$$P = U \cdot I \text{ donc } I_1 = \frac{P}{U_1} = \frac{100 \times 10^6}{63\,000} = 1,6 \text{ kA.}$$

- b. La capacité des câbles est $c = 0,7 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

- Section S_1 nécessaire pour un transport THT :

$$c = \frac{I_1}{S_1} \text{ donc } S_1 = \frac{I_1}{c} = \frac{250}{0,7} = 360 \text{ mm}^2.$$

- Section S_2 pour un transport HT :

$$c = \frac{I_2}{S_2} \text{ donc } S_2 = \frac{I_2}{c} = \frac{1\,600}{0,7} = 2\,300 \text{ mm}^2.$$

- c. On en déduit la résistance électrique dans chaque ligne :

$$R_1 = \rho \cdot S_1 \cdot L = \frac{26 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3}{360} = 7,2 \, \Omega ;$$

$$R_2 = \rho \cdot S_2 \cdot L = \frac{26 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^3}{2\,300} = 1,13 \, \Omega.$$

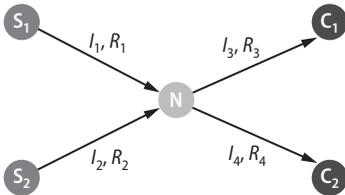
- d. On détermine les pertes en ligne :

$$PL_1 = R_1 \cdot I_1^2 = 7,2 \times 250^2 = 0,45 \text{ MW}$$

$$PL_2 = R_2 \cdot I_2^2 = 1,13 \times 1\,600^2 = 2,9 \text{ MW.}$$

La puissance perdue par effet Joule est plus importante dans un transport HT que dans un transport THT pour une même distance parcourue, d'où l'importance d'augmenter la tension pour minimiser ces pertes.

- 4. a. Modélisation du réseau électrique par un graphe orienté :



- b. Contraintes à prendre en compte pour le réseau étudié :

$$I_1 \leq I_{1\text{max}} \text{ donc } I_1 \leq 500 \text{ A ;}$$

$$I_2 \leq I_{2\text{max}} \text{ donc } I_2 \leq 450 \text{ A.}$$

$$\text{Loi des nœuds : } I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = 600 \text{ A.}$$

- c. Comme $I_1 + I_2 = 600 \text{ A}$

$$I_2 = 600 - I_1 \text{ donc } 600 - I_1 \leq 450 \text{ donc } 150 \leq I_1.$$

$$\text{Donc : } 150 \text{ A} \leq I_1 \leq 500 \text{ A.}$$

- d. Puissance dissipée par effet Joule dans le réseau :

$$P_J = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2.$$

$$\text{e. } R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 = 5 \times 350^2 + 7,2 \times 250^2$$

$$= 612\,500 + 450\,000$$

$$= 1\,062\,500 \text{ MW.}$$

$$\text{Donc : } P_J = 7,2 \times I_1^2 + 7,2 \times (600 - I_1)^2 + 1\,062\,500.$$

Ou encore :

$$P_J = 7,2 \times I_1^2 + 7,2 \times (360\,000 + I_1^2 - 1\,200 \times I_1) + 1\,062\,500.$$

$$\text{Donc : } P_J = 14,4 \times I_1^2 - 8\,640 \times I_1 + 3\,654\,500.$$

- f. Dérivée de P_J par rapport à I_1 :

$$\frac{dP_J}{dI_1} = 28,8 \times I_1 - 8\,640$$

$$\frac{dP_J}{dI_1} = 0 \text{ pour } 28,8 \times I_1 - 8\,640 = 0$$

donc pour $I_{1\text{th}} = 300 \text{ A}$.

Donc P_J admet un minimum pour une valeur $I_{1\text{th}} = 300 \text{ A}$.

- g. Ce minimum est une valeur possible de I_1 pour le réseau considéré où il faut que $150 \text{ A} \leq I_1 \leq 500 \text{ A}$.

5 L'arbre à vent

1.



$$2. n = \frac{P_{\text{arbre}}}{P_{\text{réverbère}}} = \frac{2\,500}{100} = 25 \text{ réverbères.}$$

$$3. E = P \cdot \Delta t = 2\,500 \times 10 = 25 \text{ kWh.}$$

- 4. Une éolienne ne peut fonctionner que si la vitesse du vent est comprise entre $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, et d'après le document 3, cette vitesse est loin d'être atteinte tous les jours d'un mois.

L'arbre à vent fonctionne dès que la vitesse du vent est supérieure à $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, et d'après le document 3, cette vitesse est atteinte tous les jours d'un mois.

- 5. L'utilisation de cette technique ne produit pas de dioxyde de carbone, donc pas de gaz à effet de serre.

L'impact environnemental du déploiement de ce mode de production d'électricité n'est pas pour autant nul car la conception et la construction de ce dispositif consomme :

- de l'énergie issue de sources non renouvelables carbonées ;

- des matières premières présentes en faible quantité sur Terre et dont l'extraction est souvent polluante.

La biodiversité et son évolution

LE PROGRAMME

3. Une histoire du vivant

3.1 – La biodiversité et son évolution

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'échantillon. 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).</p> <p>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.</p> <p>À l'aide d'un tableur, simuler des échantillons de même effectif pour visualiser la fluctuation d'échantillonnage.</p> <p>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>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.</p> <p>La connaissance et la gestion d'un écosystème permettent d'y préserver la biodiversité.</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> <p>Analyser des documents pour comprendre les mesures de protection de populations à faibles effectifs.</p> <p>Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème. Envisager des solutions pour un environnement proche.</p>
Prérequis et limites	
<p>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).</p>	

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ

■ p. 190

● SITUATION 1

On propose, à partir d'une approche concrète ayant éventuellement déjà été mise en œuvre en classe de 2nde ou au collège, de revoir la notion de biodiversité. L'objectif est également de remobiliser la notion de richesse spécifique d'un écosystème.

› Exemple de réponse attendue

Il serait possible d'évaluer la richesse spécifique d'un écosystème proche en effectuant un inventaire complet du site étudié, c'est-à-dire en identifiant les différentes espèces animales, végétales (ou autres) rencontrées.

Ou bien on pourrait travailler sur une zone limitée du site (en la délimitant avec de la ficelle par exemple) considérée comme représentative de l'ensemble du site.

Enfin, différents groupes pourraient travailler sur différentes zones du site montrant une biodiversité spécifique différente (pelouse, cours bitumée, murs etc.).

La richesse spécifique de cet écosystème correspondra au nombre total d'espèces le peuplant.

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

À travers l'exemple des expéditions océaniques « *Tara Oceans* », l'élève découvrira, dans l'activité 1, de nouvelles méthodes permettant de quantifier la richesse spécifique d'un écosystème. Dans l'activité 2, il approfondira les aspects mathématiques des méthodes d'échantillonnages, en particulier celle de la capture-marquage-recapture.

► SITUATION 2

On s'appuie à présent sur les acquis de génétique de la classe de 2nde, en particulier sur la diversité des allèles (polyallélisme) dans une population ou un écosystème (diversité génétique).

► Exemple de réponse attendue

Voici un exemple de tableau attendu :

Groupe sanguin	Couple d'allèles	Fréquence si possible
Groupe AB	A et B	3 %
Groupe O	O et O	43 %
Groupe A	A et O	Impossible à déterminer
	A et A	
Groupe B	B et O	
	B et B	

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

Cette étude « quantitative » de la diversité des allèles dans une population, est une première approche de la structure génétique qui sera étudiée en détail dans ce chapitre, en particulier dans l'activité 3. Elle est approfondie en classe de 1^{er} spécialité SVT pour les élèves concernés.

► SITUATION 3

Il s'agit de remobiliser la notion de sélection naturelle, abordée en classe de 2nde.

► Exemple de réponse attendue

Les braconniers tuent presque uniquement les éléphants portant des défenses. Ces derniers ont donc moins de chances de se reproduire et de

transmettre à leur descendance le ou les allèles déterminant la présence de défenses de grande taille.

Ainsi, à chaque génération, la fréquence de ce ou ces allèles diminue. C'est ce qu'on appelle la sélection naturelle.

Complément

Il peut être utile de faire remarquer à l'élève que la dérive génétique, également abordée en classe de 2nde, peut expliquer l'augmentation de fréquence des éléphants sans défenses dans les zones où les effectifs des populations d'éléphants sont faibles et où, en l'absence de braconnage, l'absence de défenses ne confère aucun avantage.

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

La sélection naturelle, comme la dérive génétique, sont des « forces évolutives » capables de faire varier dans le temps la structure génétique d'une population. L'impact de ces forces sur la structure génétique sera étudié de manière quantitative dans l'activité 4. De plus, la notion de sélection naturelle sera réinvestie au cours des chapitres suivants.

ACTIVITÉS

Ce premier chapitre du thème « Une histoire du vivant » aborde la question de la mesure de la biodiversité et de son évolution au cours du temps et à différentes échelles.

En s'appuyant sur l'exemple de l'expédition « *Tara Oceans* », l'**activité 1** permettra de définir la richesse spécifique d'un écosystème, et la manière dont on la mesure par échantillonnage. Les méthodes d'échantillonnages, en particulier celle de capture-marquage-recapture, seront détaillées dans l'**activité 2**. L'**activité 3** aborde la structure génotypique des populations, en se référant notamment au modèle théorique de Hardy-Weinberg, et à l'équilibre du même nom. Les mutations et la sélection naturelle, à l'origine d'écarts par rapport à cet équilibre, seront traitées dans l'**activité 4**. Autre force évolutive, la dérive génétique sera quant à elle abordée dans l'**activité 5**, ainsi que les autres impacts de la fragmentation des habitats sur la biodiversité. Enfin avec l'**activité 6**, ce chapitre se refermera sur les mesures que l'on peut prendre pour limiter l'érosion de la biodiversité, à travers l'exemple du castor.

C'est donc une approche plutôt quantitative de la biodiversité qui est proposée dans ce chapitre, ce qui explique le recours fréquent aux modèles et aux probabilités, comme le justifie le texte introductif dans le bulletin officiel :

« 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. »

p. 192 ■ **ACTIVITÉ 1**

Évaluer la biodiversité

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. »

Savoir-faire : « 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. »

L'activité présentée s'appuie sur les données de l'expédition *Tara Oceans*. Les expéditions menées par *Tara* bénéficient d'un accompagnement pédagogique riche. Il est tout à fait recommandé de consulter le site internet de la fondation (<https://oceans.taraexpeditions.org/>) et de regarder les très nombreuses ressources associées à cette expédition (journal de bord, interview de chercheurs, données). La ressource *Coulisses de Laboratoire* (<https://oceans.taraexpeditions.org/coulissesdelabo/index.php?page=decouvrez-le-laboratoire>) est particulièrement indiquée pour cette activité. Elle présente de manière interactive le matériel utilisé dans l'expédition.

Le **document 1** présente l'expédition *Tara Oceans* qui a eu lieu de 2009 à 2013 dans l'ensemble du globe (doc. 1b). Ce document permet également de présenter les lieux d'échantillonnages du document 3 ainsi que la définition du plancton (doc. 1a).

Le **document 2** présente une partie du matériel utilisé pour l'échantillonnage. Une partie de ce matériel peut permettre de relever des paramètres physico-chimiques du milieu. Ce document est accompagné d'une vidéo présentant l'expédition *Tara Oceans*.

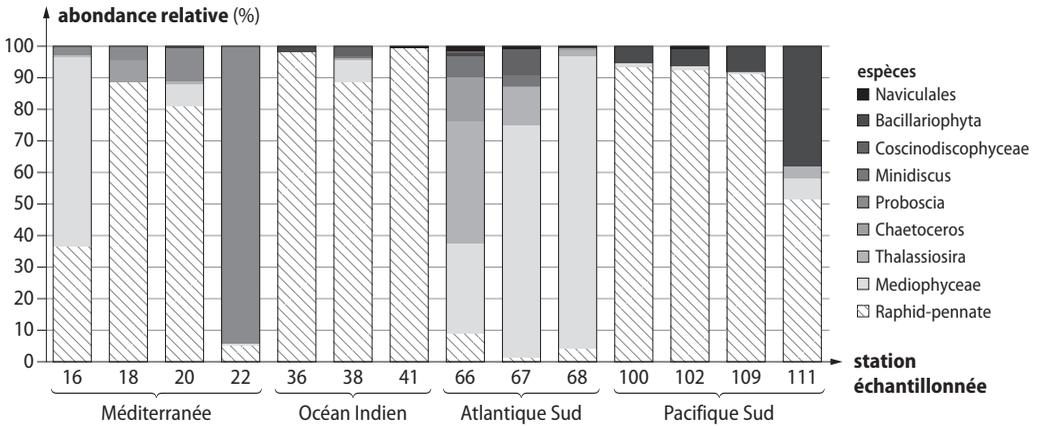
Le **document 3** s'appuie sur des données qui peuvent être téléchargées en ligne sur le site ressources de Bordas :

<https://lycee.edition-bordas.fr/9782047337615>. Deux versions sont disponibles : une version simplifiée pour l'activité et la version complète téléchargeable aussi directement sur le site de *Tara* (kit biogéographie du plancton). Le doc. 3a présente le principe de l'identification des organismes grâce à l'analyse de l'ADN, technique utilisée dans l'expédition pour identifier de nouveaux taxons. Les docs 3b et 3c présentent également deux notions qu'il est indispensable de bien différencier : la richesse spécifique et l'abondance. L'investigation permet de traiter des bases de données à partir d'un tableur (une fiche technique d'utilisation du tableur est disponible à la page 296 du manuel). On peut la mener en partie à partir du doc. 3c qui permet de traiter les points 2 et 3. La base de données propose également les données pour l'ensemble des stations placées sur le document 1b alors que seules les données des stations des océans Atlantique et Pacifique ont été conservées sur la figure. En revanche, le 4^e point demande d'accéder à la base de données.

3 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

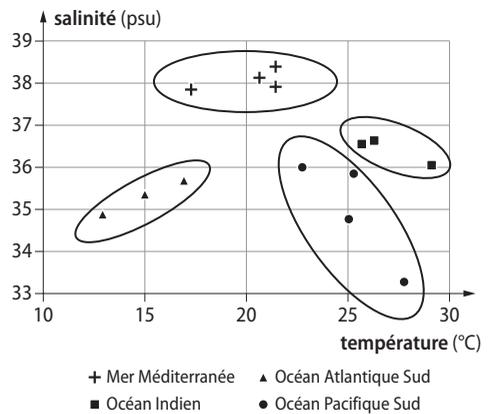
• Le graphique ci-dessous représente un exemple de production possible :



- Si on s'intéresse aux données dans chaque station, on observe que les espèces présentes dans le Pacifique Sud et l'Atlantique Sud sont pour certaines les mêmes mais représentées dans des proportions très différentes (ex. Raphid-pennate très présent dans le Pacifique, peu en Atlantique), pour d'autres présentes dans l'un ou l'autre des océans (ex. Chaetoceros présent uniquement en Atlantique Sud). On observe qu'au sein du même océan, les valeurs mesurées peuvent être très différentes.

- Pour calculer la richesse spécifique, il suffit de compter le nombre d'espèces présentes. L'Atlantique Sud présente généralement une richesse spécifique plus importante que le Pacifique Sud : 3 à 7 espèces contre 3 ou 4. Les stations du Pacifique Sud sont généralement dominées par Raphid-pennate et celle de l'Atlantique par Mediophyceae. La richesse spécifique qui correspond à la biodiversité spécifique est insuffisante pour décrire la biodiversité d'un milieu. Un milieu peut abriter beaucoup d'espèces mais avec une espèce largement dominante : sa biodiversité est alors plus faible qu'un milieu contenant autant d'espèces mais avec des abondances plus proches.

- Pour expliquer les différences observées, on peut par exemple représenter pour chaque station la salinité en fonction de la température ce qui permet de montrer que les conditions sont assez différentes d'un océan/mer à l'autre. Ainsi, on peut observer que la Méditerranée est très salée. L'océan Atlantique Sud est le plus froid alors que les océans Indien et Pacifique Sud sont plus chauds. Chaque espèce possédant ses propres préférences écologiques, on peut supposer que les conditions de température et de salinité spécifiques à chaque océan expliquent des abondances différentes.



Exemple de correction des pistes de travail

On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignant.

1. Certains instruments comme le filet ou la pompe péristaltique utilisés sur *Tara* permettent de prélever le plancton en faisant un tri en fonction de la taille des organismes prélevés. Ceci est important car les instruments utilisés pour le traitement des données ne sont pas forcément les mêmes en fonction de la taille. Les filets permettent de faire un échantillonnage sur un grand volume d'eau car ils sont déployés pendant que le bateau avance. La pompe permet de faire des prélèvements en position statique à différentes profondeurs. Enfin, la rosette CTD permet de prélever des petits échantillons d'eau mais également de mesurer de nombreux paramètres physicochimiques du milieu qui sont indispensables pour interpréter les répartitions mesurées.

2. Exploiter les séquences ADN permet d'analyser un grand nombre d'échantillons en un temps limité car la procédure est automatisée

et informatisée. De plus, il s'agit d'une méthode plus fiable qu'une simple reconnaissance visuelle des organismes. Enfin, cette méthode fournit des données à la fois sur l'abondance (relative) et sur la biodiversité (richesse spécifique).

Remarque : il convient de distinguer le metabarcoding (ou barcoding moléculaire) qui est la technique présentée ici, elle permet d'identifier et de comptabiliser les espèces présentes dans un milieu à partir d'un gène marqueur et la métagénomique où l'ensemble des génomes de l'environnement est séquencé. La 1^{re} technique permet d'évaluer la richesse spécifique ainsi que l'abondance relative dans un milieu. La 2^e technique permet d'estimer la diversité génétique du milieu indépendamment du nombre d'espèces présentes.

3. L'abondance permet de connaître le nombre d'individus de chaque espèce ou de chaque taxon. La richesse spécifique permet d'estimer le nombre d'espèces. Ces deux notions sont complémentaires. Au sein d'un taxon, comme celui des diatomées (doc. 3b), on remarque que certaines espèces sont très majoritaires par rapport à d'autres (par exemple, les Raphid-pennate représentent entre 91 et 95 % des diatomées sur les stations 100, 102 et 109). Pour décrire convenablement la biodiversité, il faut donc à la fois tenir compte de la richesse spécifique et de l'abondance. Par exemple, on voit que les opisthochontes sont les plus nombreux mais pas obligatoirement les plus diversifiés (doc. 3c). Ainsi, la richesse spécifique des alvéolés est supérieure à celle des opisthochontes.

p. 194

ACTIVITÉ 2

Estimer un effectif par échantillonnage

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. 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. »

Savoir-faire : « 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. »

Le **document 1** est entièrement consacré à la méthode de capture-marquage-recapture. La première partie du document présente le principe de cette méthode d'échantillonnage alors que sa seconde partie propose une modélisation analogique simple. L'utilisation de l'animation numérique *Edumedia* accompagnant ce document peut se substituer à cette modélisation analogique.

Le **document 2** montre comment il est possible, par un échantillonnage unique, d'estimer la fréquence d'un caractère au sein d'une population. Cette estimation est exprimée sous la forme d'un intervalle de confiance. Dans le cas donné en exemple, on peut ainsi estimer la proportion de tortues mâles comme étant comprise dans l'intervalle [42 % ; 78 %] avec un niveau de confiance de 95 %.

Cette estimation est d'autant plus précise que la taille de l'échantillon est grande comme le montre le **document 3**.



1 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

L'élève est invité à réaliser une activité pratique reposant sur cette méthode (doc. 1b). Le doc. 1c montre, à travers un exemple fictif, comment estimer, par le calcul, l'effectif d'une population en utilisant la quatrième proportionnelle (approche connue par les élèves comme celle du « produit en croix »). Cette investigation est directement exploitée par la première piste de travail.



3 Démarche expérimentale

► Exemple de correction

À l'aide d'un tableur (et en particulier la fonction ALEA()) qui renvoie des valeurs aléatoires), l'élève peut simuler la fluctuation de l'échantillonnage, dans le cas d'un effectif de 10 individus ou de

100 individus. En visualisant le résultat sous la forme d'un nuage de points, il constatera que la fluctuation de l'échantillonnage est plus forte pour 10 individus que pour 100. Les élèves peuvent s'appuyer sur la fiche technique d'utilisation du tableur disponible à la page 296 du manuel.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. L'élève est invité à réaliser la modélisation analogique de la méthode de capture-marquage-recapture, en utilisant des jetons et un feutre effaçable.

On fournit donc à l'élève un sac opaque contenant un nombre inconnu (du moins inconnu de l'élève) de jetons.

Partons de l'exemple suivant : le sac contient au départ 50 jetons (cela l'élève ne le sait pas).

Dans un premier temps, l'élève prélève un certain nombre de jetons (phase de capture), par exemple 20 jetons, et les marque (phase de marquage). Les jetons marqués sont remis dans le sac.

L'élève commence alors une série de recaptures :

- Il prélève 10 jetons, parmi eux 2 sont marqués.
- Il note ce résultat et remet les jetons dans le sac.
- Il note ce résultat et remet les jetons dans le sac.
- Il prélève à nouveau 10 jetons, parmi eux 5 sont marqués. Il note ce résultat et remet les jetons dans le sac.

Il reproduit cette opération plusieurs fois et note le nombre de jetons marqués : 6, 6, 2, 4, 4, 3, 5, 4.

• 1^{re} partie : estimation de l'effectif total

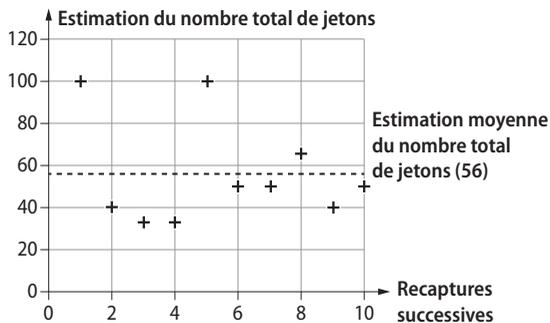
Pour estimer le nombre de jetons dans le sac, on utilise la formule suivante : $N = R \times \frac{M}{m}$, où R est le nombre d'individus recapturés, M le nombre d'individus marqués initialement, et m le nombre d'individus marqués parmi les recapturés.

En se basant sur la première recapture, où 2 jetons marqués sont comptés, on peut estimer le nombre total de jetons à : $N = 10 \times \frac{20}{2} = 100$.

Les autres recaptures aboutissent aux estimations suivantes : 40, 33, 33, 100, 50, 50, 66, 40, 50. Si l'on réalise une moyenne, on obtient une estimation de 56 jetons.

• 2^e partie : visualisation de la fluctuation d'échantillonnage

Pour visualiser la fluctuation d'échantillonnage, l'élève peut, par exemple, saisir en colonne le nombre total de jetons estimé qu'il a compté lors de chaque recapture, et représenter ces données sous la forme d'un nuage de points.



Représentation sous la forme d'un nuage de points de la fluctuation d'échantillonnage.

2. Dans l'exemple donné dans le document 2, il n'est pas possible, avec un niveau de confiance de 95 %, d'affirmer qu'il y a davantage de mâles que de femelles.

En effet, la valeur 50 % étant comprise dans l'intervalle de confiance [42 % ; 78 %], il est tout à fait possible qu'il y ait en réalité autant de mâles (voire moins de mâles !) que de femelles dans la population de tortues.

Qu'en est-il avec ces nouvelles données ?

Cette fois-ci l'effectif de l'échantillon est $n = 120$.

La fréquence des mâles est $f = \frac{72}{120} = 0,6$.

Pour déterminer l'intervalle de confiance, il faut également calculer $\frac{1}{\sqrt{n}} = 0,09$. L'intervalle de

confiance est de $[f - \frac{1}{\sqrt{n}} ; f + \frac{1}{\sqrt{n}}] = [0,6 - 0,09 ; 0,6 + 0,09]$ soit [0,51 ; 0,69] ou encore [51 % ; 69 %].

On remarque que l'intervalle est entièrement situé au-dessus de 50 %. La surreprésentation des mâles est donc avérée avec un niveau de confiance de 95 %.

3. Si on observe le graphique du document 3, on constate que les valeurs sont bien moins dispersées avec des échantillons de 100 individus. Avec un échantillon de 100 individus, elles fluctuent entre 0,4 et 0,6 alors qu'avec 10 individus, elles fluctuent entre 0,1 et 0,9.

L'amplitude de la fluctuation d'échantillonnage semble donc d'autant plus petite que l'échantillon est grand.

Structure génétique d'une population

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Au cours de l'évolution biologique, la composition génétique des populations d'une espèce change de génération en génération. Le modèle mathématique de Hardy-Weinberg utilise la théorie des probabilités pour décrire le phénomène aléatoire de transmission des allèles dans une population. En assimilant les probabilités à des fréquences pour des effectifs de grande taille (loi des grands nombres), le modèle prédit que la structure génétique d'une population de grand effectif est stable d'une génération à l'autre sous certaines conditions (absence de migration, de mutation et de sélection). Cette stabilité théorique est connue sous le nom d'équilibre de Hardy-Weinberg. »

Savoir-faire : « Pour la transmission de deux allèles dans le cadre du modèle de Hardy-Weinberg, établir les relations entre les probabilités des génotypes d'une génération et celles de la génération précédente.

Produire une démonstration mathématique 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). »

La notion de structure génétique d'une population est décrite dans le **document 1**. En particulier, la différence entre fréquences alléliques et fréquences génotypiques (doc. 1c) est illustrée par un diagramme représentant une population fictive (doc. 1b). Une formule est également donnée pour calculer les fréquences alléliques à partir des fréquences génotypiques.

Le **document 2** présente le modèle théorique de Hardy-Weinberg qui permet de prévoir les fréquences génotypiques à partir des fréquences alléliques, dans certaines conditions (effectif infini, pas de mutations, pas de sélection, pas de migrations, pas de dérive génétique, panmixie). Par ailleurs, de ce modèle découle l'équilibre de Hardy-Weinberg, qui prédit que dans ces conditions, la structure génétique de la population ne varie pas au cours du temps. Un document numérique d'accompagnement (facultatif) explique pourquoi il est possible d'assimiler mathématiquement des probabilités avec des fréquences et donc d'établir le lien entre la probabilité de chaque génotype et sa fréquence au sein d'une population.

Le **document 3** présente un cas concret de population, échantillonnée à 2 mois d'intervalle afin d'en établir la structure génétique. Ce cas permettra de réaliser divers calculs de

fréquences alléliques et génotypiques, et de les confronter au modèle de Hardy-Weinberg.

Remarque : cette partie étant redondante avec le programme de spécialité de SVT, il est fortement recommandé de la traiter d'abord en enseignement scientifique et ensuite seulement en spécialité.

2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

Au sein de la population théorique du document 1, on nous indique une fréquence allélique f_{A1} de 45 % soit 0,45 et de 55 % soit 0,55 pour f_{A2} .

On peut calculer la fréquence de l'allèle $A1$ à la génération suivante ainsi :

$$f_{A1} = p^2 + 0,5 \times 2pq$$

$$f_{A1} = 0,45^2 + 0,5 \times 2 \times 0,45 \times 0,55$$

$$f_{A1} = 0,2025 \times 0,45 \times 0,55$$

$$f_{A1} = 0,45$$

En conséquence f_{A2} vaut à la seconde génération $1 - 0,45 = 0,55$.

On peut donc dire la fréquence des allèles de génération en génération sera stable d'après ce modèle.

► Exemple de correction des pistes de travail

On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignant.

1. L'objectif de cette piste de travail est de s'entraîner à calculer les fréquences alléliques et génotypiques à partir d'effectifs.

Pour calculer la fréquence génotypique, il suffit de diviser le nombre d'individus portant un génotype donné par l'effectif total de la population.

$$f_{A1//A1} = \frac{2}{10} = 0,2 \text{ soit } 20 \%$$

$$f_{A1//A2} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ soit } 50 \%$$

$$f_{A2//A2} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ soit } 30 \%$$

Pour calculer la fréquence allélique à partir de la fréquence génotypique, on utilise la formule donnée dans le document 1.

$$f_{A1} = f_{A1//A1} + \frac{1}{2}f_{A1//A2} = 0,2 + \frac{0,5}{2} = 0,45 \text{ soit } 45 \%$$

$$f_{A2} = \frac{1}{2}f_{A1//A2} + f_{A2//A2} = \frac{0,5}{2} + 0,3 = 0,55 \text{ soit } 55 \%$$

2. Dans le document 3, on ne dispose que des fréquences génotypiques. Pour calculer la fréquence allélique, on utilisera donc la formule du document 1, comme précédemment.

- Pour l'échantillon du 17/05/1982 :

$$f_F = f_{F//F} + \frac{1}{2}f_{F//S} = 0,371 + \frac{0,474}{2} = 0,608$$

$$f_S = f_{S//S} + \frac{1}{2}f_{F//S} = 0,155 + \frac{0,474}{2} = 0,392$$

- Pour l'échantillon du 17/05/1982 :

$$f_F = f_{F//F} + \frac{1}{2}f_{F//S} = 0,382 + \frac{0,462}{2} = 0,613$$

$$f_S = f_{S//S} + \frac{1}{2}f_{F//S} = 0,156 + \frac{0,462}{2} = 0,387$$

On constate que les fréquences des allèles ont peu varié au cours du temps (f_S est passée de 0,392 à 0,387 en 2 mois soit 8 générations). On en déduit que les populations de Daphnies ne subissent aucune force évolutive significative.

Remarque : c'est l'absence d'évolution des fréquences alléliques (et donc l'équilibre de Hardy-Weinberg) qui permet de dire que la population ne subit pas de forces évolutives.

3. Cette fois-ci on part des valeurs de fréquences alléliques calculées dans la question précédente pour calculer les fréquences génotypiques prédites par le modèle de Hardy-Weinberg, en utilisant les formules données par le document 2b.

Si la population se trouve dans les conditions du modèle de Hardy-Weinberg, les fréquences des génotypes devraient être :

- Pour l'échantillon du 17/05/1982 :

$$f_{S//S} = f_S^2 = 0,153$$

$$f_{S//F} = 2 \times f_S \times f_F = 0,477$$

$$f_{F//F} = f_F^2 = 0,370$$

- Pour l'échantillon du 27/07/1982 :

$$f_{S//S} = f_S^2 = 0,150$$

$$f_{S//F} = 2 \times f_S \times f_F = 0,474$$

$$f_{F//F} = f_F^2 = 0,376$$

Les fréquences prédites par le modèle de Hardy-Weinberg sont très proches des fréquences génotypiques observées.

Remarque : le fait que les fréquences prédites correspondent aux fréquences observées est surtout la conséquence du grand effectif des Daphnies et de la panmixie. On ne peut pas en déduire l'absence de forces évolutives car ces dernières peuvent être présentes mais ne pas affecter de façon significative la structure génétique de cette population.

Des forces évolutives à l'œuvre

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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.). »

Savoir-faire : « Utiliser des logiciels de simulation basés sur ce modèle mathématique. Analyser une situation d'évolution biologique expliquant un écart par rapport au modèle de Hardy-Weinberg. ».

Dans cette activité on va s'attacher à expliquer l'évolution des fréquences alléliques au sein des populations, en identifiant les forces évolutives à l'œuvre. La dérive génétique sera quant à elle traitée dans l'activité 5.

Dans le **document 1**, on montrera que les mutations, si elles représentent effectivement une force évolutive, ont un impact très modeste sur l'évolution des fréquences alléliques (ce qui n'enlève rien au fait qu'elles sont à la source de la diversification génétique). Une activité tableur est proposée pour laquelle les élèves pourront s'aider de la fiche technique en page 296 du manuel.

Dans le **document 2**, on remobilisera la notion de sélection naturelle, déjà abordée au collège et en classe de 2^{nde}, en montrant son impact sur l'évolution de la fréquence de certains allèles au travers d'un exemple concret.

Dans le **document 3**, on envisagera le cas particulier où le génotype hétérozygote est le plus avantageux. Dans ce cas, aucun des deux allèles ne sera éliminé par la sélection naturelle, et un équilibre s'instaurera.

Enfin, le **document 4** abordera un aspect particulier de la sélection naturelle : la sélection sexuelle. Le cas étudié est lui aussi particulier dans le sens où l'allèle responsable du caractère le plus avantageux dans la reproduction est également le moins avantageux en termes de survie.

1 Pour mener une investigation

Exemple de correction

Si on considère que le tableur est organisé comme ici :

	A	B	C
1	Génération	f_A (%)	f_a (%)
2	0	100	0
3	1		
4	2		
5	3		

La formule permettant de calculer f_a en fonction de f_A pour un taux de mutation de 0,01 % (soit 0,0001) est :

$f_a = C2 + B2 * 0,0001$ à rentrer dans la cellule C3.

La formule permettant de calculer f_A en fonction de f_a est alors : $f_A = 100 - C3$ à rentrer dans la cellule B3.

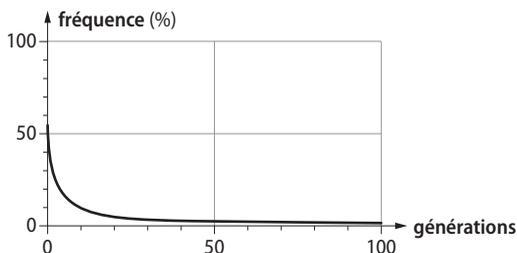
Après extension à la génération 200, on obtient pour f_A la valeur 98 % (98,02 % précisément) et pour f_a la valeur de 2 % (1,98 % précisément), ce qui est bien sûr très inférieur à la situation d'un taux de mutation 100 fois plus élevé.

3 Démarche expérimentale

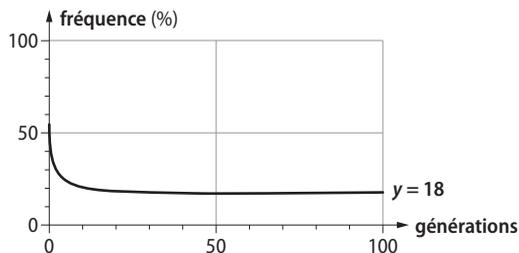
Exemple de correction

On propose ici d'utiliser l'application en ligne : Evolution allélique (<https://www.pedagogie.ac-nice.fr//svt/productions/evolution-allele/>). Dans cette application, l'allèle 1 doit être *HbS* afin de suivre graphiquement l'évolution de sa fréquence. L'allèle 2 est donc *HbA*. On peut laisser la fréquence initiale de l'allèle *HbS* à 50 % afin de mieux visualiser la diminution de sa fréquence par sélection naturelle.

Dans un environnement sans paludisme, les valeurs sélectives des génotypes *HbS//HbA* et *HbA//HbA* sont identiques entre elles (puisque l'allèle *HbS* est récessif) et supérieures à la valeur sélective du génotype *HbS//HbS* par exemple, respectivement 1 et 0,1. Dans cette configuration, on observe bien une chute de la fréquence de l'allèle *HbS* puisqu'il n'est pas avantageux dans cet environnement.



Dans un environnement avec paludisme, la valeur sélective du génotype *HbS//HbA* est la plus élevée car l'allèle *HbS* offre une « protection » vis-à-vis du paludisme. On peut donc imaginer diminuer la valeur sélective du génotype *HbA//HbA* à 0,8. On obtient alors :



Les élèves peuvent être amenés à réaliser différentes simulations en fonction des valeurs sélectives choisies.

Exemple de correction des pistes de travail

On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignant.

1. En faisant apparaître des allèles mutés (par exemple l'allèle *a*), les mutations sont responsables d'une baisse de la fréquence de l'allèle *A*. Si on réalise l'activité proposée dans le document 1, avec un taux de mutation de 0,01 %, on constate qu'au bout de 200 générations, la fréquence de l'allèle *A* est encore de 98 %.

On peut donc dire que, dans ces conditions, l'évolution de la fréquence allélique est très lente.

Il ne s'agit pas de minimiser l'importance des mutations dans l'évolution. Il n'est pas inutile de rappeler que ce sont les mutations qui sont à l'origine des nouveaux allèles, et qui sont donc la source de la diversité génétique. Cependant, à elles seules, c'est-à-dire si elles ne sont pas associées à une sélection naturelle ou à de la dérive génétique, elles font peu varier les fréquences alléliques.

2. On constate sur le graphique que la fréquence de l'allèle *vg-* diminue au cours du temps, passant de 0,5 à presque 0 en 50 semaines. Cette diminution s'explique par le fait que les individus présentant le génotype *vg-//vg-* sont dotés d'ailes vestigiales et, ne pouvant pas voler, auront de grandes difficultés à se nourrir et beaucoup mourront avant de pouvoir se reproduire.

Les individus portant l'allèle *vg+* auront un plus grand succès reproducteur, et transmettront l'allèle *vg+* à leur descendance, au détriment de *vg-*, ce qui explique la baisse de sa fréquence de génération en génération : c'est la sélection naturelle.

3. L'allèle *HbS* est responsable, chez les individus homozygotes (*HbS//HbS*) d'une maladie très invalidante, la drépanocytose. On pourrait donc s'attendre à ce que la fréquence de l'allèle *HbS* soit presque nulle, les individus portant cet allèle à l'état homozygote étant fortement défavorisés (sans traitement adapté, beaucoup meurent avant d'arriver à l'âge de se reproduire). Cependant, non seulement les individus hétérozygotes ne souffrent pas des symptômes de cette maladie, mais ils sont résistants au paludisme.

Dans les régions frappées par le paludisme, le génotype le plus avantageux est donc *HbA//HbS*, puisqu'il confère la résistance au paludisme. Les individus portant ce génotype auront donc un avantage reproductif par rapport aux individus *HbA//HbA*, et comme ils transmettent une fois sur deux l'allèle *HbS*, la fréquence de ce dernier se maintient à une valeur non nulle.

Un mécanisme similaire expliquerait la fréquence anormalement élevée des allèles responsables de la mucoviscidose (considérée comme la plus fréquente des maladies génétiques graves en Europe et en Amérique du Nord). Il a été envisagé que les individus hétérozygotes (porteurs sains de l'un de ces allèles) puissent être en partie résistants à des maladies comme le choléra ou la tuberculose.

4. Les individus portant l'allèle *Ho+* présentant des cornes ont davantage accès aux femelles. On pourrait donc penser que la fréquence de l'allèle *Ho+* ne fait qu'augmenter au cours du temps, jusqu'à ce que ce dernier s'impose dans la population. Cependant, l'allèle *Ho+* est également à l'origine d'une durée de vie moindre chez les individus qui le portent à l'état homozygote (*Ho+//Ho+*).

Finalement, le génotype le plus avantageux est le génotype hétérozygote *Ho+//Ho-*, puisque les individus présentent des cornes, mais également une bonne longévité. Comme ils transmettent l'allèle *Ho-*, ce dernier se maintient dans la population.

*Cet exemple est similaire à celui envisagé dans la question précédente. Encore une fois, le génotype le plus avantageux est le génotype hétérozygote qui combine les avantages en termes de survie de l'allèle *Ho-* et les avantages en termes d'accès aux femelles conférés par l'allèle *Ho+*. Cet « avantage hétérozygote », aussi appelé hétérosis, est très fréquent chez les végétaux, et explique pourquoi les agriculteurs affectionnent les variétés hybrides F1 (hétérozygotes).*

Fragmentation des habitats et biodiversité

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. »

Savoir-faire : « Utiliser un modèle géométrique simple (quadrillage) pour calculer l'impact d'une fragmentation sur la surface disponible pour une espèce. À partir d'un logiciel de simulation, montrer l'impact d'un faible effectif de population sur la dérive génétique et l'évolution rapide des fréquences alléliques. »

La compréhension de l'impact de la fragmentation des habitats sur la biodiversité, qui connaît actuellement une crise majeure, constitue un enjeu important pour nos sociétés.

Le **document 1** présente un exemple d'impact de fragmentation sur la biodiversité, ici d'espèces d'oiseaux. L'exemple d'Amazonie, très classique, a été choisi.

Le **document 2** présente un exemple de modélisation de la fragmentation. L'idée est de montrer que l'aire géographique concernée par la fragmentation ne se limite pas juste à la surface recouverte par l'aménagement mais est beaucoup plus étendue.

Le **document 3** présente un exemple d'appauvrissement génétique lié à la fragmentation, ici la roquette de mer.

Enfin, le **document 4** présente une modélisation permettant de montrer que les populations à petit effectif sont beaucoup plus soumises à la dérive génétique liée au hasard qui conduit à un appauvrissement génétique de la population. Une application interactive *Edumedia* permet de concrétiser cette modélisation.

2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• Dans la modélisation proposée, chaque carreau fait 50 m de côté et correspond donc à une surface de 2 500 m². Au départ, la population peut occuper 64 carreaux sans interruption, ce qui correspond à une surface maximale de 64 × 2 500 = 160 000 m². Or, la densité de population de cette espèce est au maximum de 400 individus au km²

soit 10^6 m^2 . La population initiale est donc de $\frac{1,6 \times 10^5 \times 400}{10^6} = 64$ individus. Autrement dit, on aura au maximum 1 individu par carreau.

- La construction de la route enlève de l'espace (16 carreaux) soit $16 \times 2\,500 = 40\,000 \text{ m}^2$. Elle sépare aussi la population en deux populations occupant chacune 24 carreaux soit 24 individus pour chaque zone.
- La construction d'une seconde route perpendiculaire enlève encore 6 carreaux (soit $15\,000 \text{ m}^2$) et sépare les deux populations précédentes en quatre populations de 9 individus.
- Si l'on compare l'évolution de la surface forestière totale par fragment (on considère la surface occupée par la route comme négligeable) avec celle de l'effectif de la population :

Nombre de fragments	Surface forestière totale par fragment (en m^2)	Effectif de la population par fragment
1	250 000	64
2	125 000	24
4	62 500	9

On constate que l'effectif de la population diminue plus vite (elle est divisée par 2,66 à chaque étape) que la surface de chaque fragment (qui n'est que divisée par 2 à chaque étape) du fait des exigences écologiques de l'espèce.

Ainsi, la fragmentation de l'habitat réduit rapidement et fortement l'effectif d'une population, risquant de la faire disparaître.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. On observe que plus la fragmentation des écosystèmes est importante, plus la richesse spécifique est faible. Par exemple, pour une surface fragmentée de 10 ha, il y a 2 espèces d'oiseaux contre 5 pour une surface identique non fragmentée.

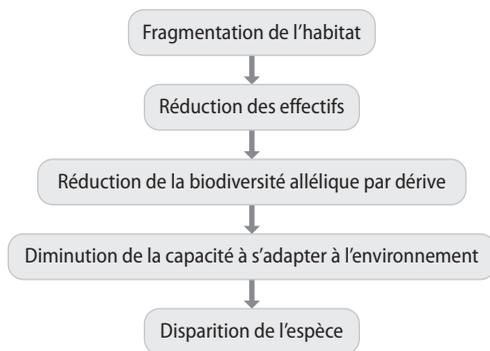
2. La fragmentation de l'habitat conduit à une réduction des effectifs qu'il peut accueillir. Selon les espèces considérées et leurs exigences écologiques, la réduction de leurs effectifs peut conduire à leur disparition de la zone fragmentée d'où une baisse de la richesse spécifique.

3. On constate dans le doc. 3 que le nombre moyen d'allèles par gènes des populations de roquette de mer est inférieur en 2005 par rapport

à 2000, suite à une augmentation de la fragmentation de leur habitat. Le pourcentage de gènes dotés de plusieurs allèles diminue (de 7 points). Il y a donc un appauvrissement de la biodiversité génétique de ces populations se traduisant par la perte d'allèles (3 ont complètement disparu).

Cela peut s'expliquer par la dérive génétique qui correspond à une évolution aléatoire de la fréquence d'un allèle dans une population. Cette dérive est très forte si la population est réduite, ce qui est le cas si l'habitat est fragmenté. Si la dérive génétique est forte, certains allèles disparaissent : pour 10 individus, la majorité des allèles disparaissent en un temps très court (moins de 60 générations) contre 300 pour une population de 100 individus.

4. On peut proposer le schéma suivant :



p. 202 ■ **ACTIVITÉ 6**

Préserver la biodiversité

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. La connaissance et la gestion d'un écosystème permettent d'y préserver la biodiversité. »

Savoir-faire : « 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. »

La biodiversité fait partie des ressources majeures de l'humanité en termes de matériaux, médicaments et ressources énergétiques comme cela

est abordé en 2^{nde} et en 1^{re} spécialité SVT au travers de l'étude des services écosystémiques. De fait, sa protection constitue un enjeu majeur pour le fonctionnement de nos sociétés.

Le **document 1** présente des données récentes qui quantifient le déclin de la biodiversité (doc. 1a) et les causes de ce déclin (doc. 1b) très documenté chez les Vertébrés. Ce document permet de réactiver des connaissances de 2^{nde}.

Les **documents 2, 3 et 4** s'intéressent à une espèce importante pour la biodiversité locale : le castor européen (doc. 2). Cet exemple est intéressant car le castor, longtemps menacé en Europe (doc. 3), a fait l'objet de mesures de protection permettant de limiter son déclin (doc. 4).

Le **document 2** montre que le castor est une espèce importante car capable de modifier son environnement. Ainsi, la sauvegarde du castor n'a pas qu'un impact sur cette espèce mais sur un écosystème entier.

Le **document 3** présente quelques-unes des menaces qui ont pesé sur le castor européen. C'est l'occasion de revenir aussi sur la fragmentation de l'habitat abordée dans l'activité précédente.

Le **document 4** présente quelques mesures simples qui ont permis de sauver les castors européens en France. La connaissance et la gestion de cette espèce ont donc permis de limiter l'impact des activités humaines sur les écosystèmes façonnés par le castor.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Le déclin de biodiversité actuellement observé est préoccupant car il touche tous les milieux de vie (terrestre, eau douce et marin) et tous les groupes de Vertébrés avec des différences d'abondance importantes allant de -36 % à -81 % ! En moyenne, les effectifs de Vertébrés se sont réduits de 58 % en 42 ans seulement.

Les deux causes principales sont la dégradation des habitats notamment en milieu continental et l'exploitation des espèces (chasse et pêche) particulièrement en milieu océanique.

2. Le castor est une espèce dite « ingénieure » car il modifie son environnement en édifiant des barrages, ce qui crée des zones humides où de nombreuses espèces peuvent se développer. Il est donc à l'origine de la formation de véritables écosystèmes susceptibles d'abriter une forte biodiversité.

3. On peut proposer le tableau suivant :

Menaces	Mesures
Chasse	Interdiction légale depuis 1909 Classement en espèce protégée depuis 1968
Compétition avec le castor canadien	Réintroduction du castor européen
Fragmentation de son habitat par la construction d'infrastructures	Installation de systèmes permettant de passer certains obstacles Maintien des berges à l'état sauvage
Destruction de son habitat par l'Homme dont les cultures sont menacées	Classement en espèce protégée depuis 1968 Protection des cultures Déplacement des animaux

CORRECTION DES EXERCICES

p. 207 ■

Vérifier ses connaissances

1 Questions à réponse unique

A-3

Les réponses 2 et 4 sont fausses car sélection naturelle et dérive génétique sont deux forces évolutives conduisant à une évolution de la structure génétique d'une population donc au non-respect de l'équilibre de Hardy-Weinberg.

Cet équilibre ne s'applique que si la population est d'effectif infini et que chaque individu s'y reproduit aléatoirement (revoir les activités 3 et 4).

B-1

Les réponses 2 et 4 correspondent à des situations de sélection naturelle car on y évoque la possibilité d'avantages fournis par les caractères étudiés or la dérive génétique ne s'applique qu'aux cas où les caractères n'apportent ni avantages ni désavantages. La réponse 3 est fausse car la technique de capture-marquage-recapture ne permet d'évaluer que l'abondance d'une population et non les fréquences alléliques.

La dérive génétique est donc d'autant plus forte que l'effectif est limité, ce qui entraîne un risque de disparition d'allèles de la population, ce qui, sera à l'origine de son affaiblissement génétique (revoir l'activité 5).

C-4

On peut indiquer l'ordre d'importance de ces menaces de la plus grave à la moins grave :
 $4 > 3 > 2 > 1$.

2 Restituer les notions essentielles du cours

a. Les conditions qui doivent être respectées sont : un effectif infini (ou considéré comme tel d'où une dérive génétique négligeable), pas de mutations, pas de migrations, pas de sélection (naturelle ou sexuelle), et des croisements aléatoires entre les individus.

b. La fragmentation de l'habitat est à l'origine d'une baisse de l'effectif qui provoque un appauvrissement génétique sous l'effet de la dérive, entraînant une mise en danger de la population. Par exemple, une population pourrait devenir sensible à un agent pathogène, que l'on peut imaginer être la cause d'une maladie mortelle, si elle perdait un allèle permettant de lui résister. Dans ce cas, de nombreux individus succomberaient.

c. De nombreuses activités humaines conduisent à une fragmentation et une dégradation des habitats par la pollution, la surexploitation, l'introduction d'espèces invasives (volontaires ou non). Ces phénomènes sont accentués par le changement climatique et ont pour conséquence la réduction de la biodiversité à toutes les échelles : écosystémique, spécifique (diminution des effectifs populationnels et extinction d'espèces) et génétique (perte de la diversité allélique).

3 Avoir un regard critique

a. Pour remplir les conditions d'équilibre de Hardy-Weinberg, la population doit avoir un effectif suffisamment important pour qu'on le considère comme infini.

b. L'estimation est au contraire d'autant plus précise que l'effectif de l'échantillon est important car plus proche de la réalité.

c. Le fait qu'un caractère soit dominant ne permet pas de prédire que sa fréquence va forcément augmenter dans une population. Par exemple, si ce caractère est désavantageux, sa fréquence baissera par sélection naturelle.

4 Retrouver une notion du cours

On constate que la fréquence de l'allèle *AdhF* augmente au cours du temps (elle passe de 30 % à presque 100 % en 50 générations).

L'enzyme résultant de l'expression de *AdhF* étant plus active que pour *AdhS*, on peut supposer que les drosophiles portant cet allèle détoxifient plus efficacement l'éthanol, et survivent mieux. Elles pourront donc davantage se reproduire que les autres et mieux transmettre leurs allèles à la génération suivante.

Le phénomène qui explique l'augmentation de la fréquence de cet allèle est donc la sélection naturelle.

5 Retour sur les problématiques

• Comment inventorier et mesurer la biodiversité ?

La biodiversité (ou richesse) spécifique d'un écosystème correspond au nombre d'espèces différentes qui le composent. Pour l'estimer, on a recouru à diverses méthodes d'échantillonnages comme la méthode de capture-marquage-recapture ou encore l'analyse d'échantillons d'ADN comparés à des banques de données d'espèces connues.

• Comment décrire la biodiversité génétique des populations ?

La structure génétique d'une population correspond aux fréquences des allèles présents dans la population et des génotypes des individus. Si cette population présente un effectif important, qu'elle ne subit aucune force évolutive, et que les croisements y sont aléatoires, on dit qu'elle est en équilibre de Hardy-Weinberg, ce qui signifie que sa structure génétique ne change pas d'une génération à la suivante. Si des forces évolutives telles que la dérive génétique (lorsque l'effectif est faible) ou la sélection naturelle, s'exercent, alors la structure génétique de la population varie au cours du temps.

• Comment protéger la biodiversité de l'impact des activités humaines ?

La biodiversité est menacée par les conséquences des activités humaines, en particulier la dégradation des habitats, la pollution, la surexploitation des ressources et le changement climatique qui découle de l'utilisation des combustibles fossiles. Pour la préserver, il est nécessaire de mieux connaître les écosystèmes et d'adopter des modes de gestion durables de ceux-ci, tout en se dotant de lois de protection de l'environnement. Dans de nombreux cas, des dispositifs simples et/ou une gestion des individus des populations menacées peut faire la différence.

Exercice similaire

7 Structure génétique d'une hêtraie

1. Calcul des fréquences alléliques :

Effectif : $N = 133 + 52 + 6 = 191$.

$$f_{P1} = f_{P1//P1} + \frac{1}{2} f_{P1//P2} = \frac{133}{191} + \frac{1}{2} \left(\frac{52}{191} \right) = 0,83$$

$$f_{P2} = 1 - f_{P1} = 0,17$$

La fréquence de l'allèle $P1$ est de 0,83 (83 %), celle de l'allèle $P2$ est de 0,17 (17 %).

2. Le modèle théorique de Hardy-Weinberg prévoit la structure génétique suivante :

$$f_{P1//P1} = f_{P1}^2 = 0,69$$

$$f_{P1//P2} = 2 \times f_{P1} \times f_{P2} = 0,28$$

$$f_{P2//P2} = f_{P2}^2 = 0,03$$

Les fréquences génotypiques observées dans la population ont pour valeur :

$$f_{P1//P1} = \frac{133}{191} = 0,70 \quad f_{P1//P2} = \frac{52}{191} = 0,27 \quad f_{P2//P2} = 0,03$$

Les fréquences génotypiques observées sont bien égales à celles prédites par le modèle de Hardy-Weinberg (à 1 % près).

S'entraîner

8 Recensement d'un élevage de truites

1. On commence par calculer le nombre moyen d'individus marqués et recapturés par jour.

$$m = \frac{(5+2+2+7+8+4+4)}{7} = 4,57$$

Puis on applique la formule donnée dans le « Coup de pouce » :

$$N = n \times \frac{m_0}{m} = 70 \times \frac{30}{4,57} = 460$$

On peut estimer à 460 le nombre de truites dans le bassin.

2. Pour améliorer la précision de l'estimation, l'éleveur peut augmenter la taille de son échantillon afin de diminuer la fluctuation d'échantillonnage. Concrètement, il peut par exemple prélever 50 truites quotidiennement au lieu de 30.

3. Sur l'échantillon de 125 truites, 37 sont parasitées.

La fréquence de ce caractère au sein de notre échantillon est égale à : $f = \frac{37}{125} = 0,296$ (soit 29,6 %).

L'intervalle de confiance, pour un niveau de confiance de 95 %, peut être établi ainsi :

$$\left[f - \frac{1}{\sqrt{n}} ; f + \frac{1}{\sqrt{n}} \right] \quad (n \text{ étant l'effectif de l'échantillon}).$$

L'intervalle de confiance correspondant à notre estimation ($n = 125$) est donc :

$$[0,296 - 0,089 ; 0,296 + 0,089]$$

$$[0,207 ; 0,385]$$

$$[20,7 \% ; 38,5 \%]$$

Avec un niveau de confiance de 95 %, on peut estimer le pourcentage des truites du bassin porteuses du parasite comme étant compris entre 20,7 % et 38,5 %.

9 Un label pour garantir des pratiques durables

1. S'engager à ce que l'exploitation ne conduise pas à une régression de la diversité des espèces d'arbres :

- préserver les sols ;
- maintenir les zones humides ;
- déclarer systématiquement les dégâts causés par le gibier.

2. Le débat pourra porter par exemple sur ces arguments :

	Point de vue des exploitants	Point de vue des écologistes
Diversité des espèces d'arbres	On souhaiterait se limiter à 1 ou 2 espèces d'arbres, uniquement celles que l'on peut commercialiser.	Il faut maintenir le plus grand nombre possible d'arbres dans la forêt afin d'avoir une richesse spécifique élevée.
Zones humides	Les zones humides ne rapportent rien et compliquent l'exploitation de la forêt.	Le maintien des zones humides est indispensable si l'on souhaite conserver une biodiversité écosystémique importante. Beaucoup d'oiseaux par exemple se nourrissent dans ces milieux.
Coupes claires	Les coupes claires sont la méthode la plus rentable et la plus efficace pour renouveler la forêt et favoriser la croissance d'arbres de grande taille.	Les coupes claires sont une méthode très agressive et nuisible pour les écosystèmes. Il faut en limiter le plus possible le recours.

10 Un programme pour vérifier l'équilibre de Hardy-Weinberg

Remarque : les élèves peuvent s'appuyer sur la fiche technique de l'utilisation de Python à la page 294 du manuel.

1. Lignes à compléter (ce n'est que l'implémentation en Python des formules vues dans les activités) :

```
#fréquences initiales
fA=0.25
fB=1-fA

#on répète sur 10 générations
for i in range (10):
    print ("Génération n°",i)
    # calcul de la fréquence des génotypes
    # à partir de celle des allèles
    fAA=fA*fA
    fAB=2*fA*fB
    fBB=fB*fB
    print ("f(A//A)=",fAA," f(A//B)=",fAB," f(B//B)=",fBB)
    # calcul de la nouvelle fréquence des allèles
    # à partir de celle des génotypes
    fA=fAA+fAB/2
    fB=fBB+fAB/2
    print ("f(A)=",fA," f(B)=",fB)
```

Résultat de l'exécution du programme (visible dans la console / terminal) :

```
Génération n° 0
f(A//A)= 0.0625 f(A//B)= 0.375 f(B//B)= 0.5625
f(A)= 0.25 f(B)= 0.75
Génération n° 1
f(A//A)= 0.0625 f(A//B)= 0.375 f(B//B)= 0.5625
f(A)= 0.25 f(B)= 0.75
(...)
Génération n° 9
f(A//A)= 0.0625 f(A//B)= 0.375 f(B//B)= 0.5625
f(A)= 0.25 f(B)= 0.75
```

2. Le modèle prévoit que la fréquence des allèles ne doit pas varier au cours du temps. C'est bien ce que l'on obtient ici, les résultats sont conformes au modèle.

3. La force évolutive que l'on souhaite modéliser est ici la sélection naturelle (les individus portant le génotype *B//B* mourant avant de pouvoir se reproduire).

4. Il faut affecter la valeur 0 à la variable *fBB* (étant donné que les individus de génotype *B//B* meurent à la naissance, la fréquence des individus *B//B* est nulle dans la population).

À la place de $fBB=fB*fB$, il faut mettre : $fBB=0$.

Comme la somme des fréquences doit être égale à 1 (et qu'en mettant à 0 la valeur de *fBB*, ce n'est plus le cas), il faut immédiatement après recalculer les fréquences génotypiques :

```
fTotal=fAA+fAB
fAA=fAA/fTotal
fAB=fAB/fTotal
```

```
#fréquences initiales
fA=0.25
fB=1-fA

#on répète sur 10 générations
for i in range (10):
    print ("Génération n°",i)
    # calcul de la fréquence des génotypes
    # à partir de celle des allèles
    fAA=fA*fA
    fAB=2*fA*fB
    fBB=0 #les individus BB sont morts
    fTotal=fAA+fAB
    fAA=fAA/fTotal
    fAB=fAB/fTotal
    print ("f(A//A)=",fAA," f(A//B)=",fAB," f(B//B)=",fBB)
    # calcul de la nouvelle fréquence des allèles
    # à partir de celle des génotypes
    fA=fAA+fAB/2
    fB=fBB+fAB/2
    print ("f(A)=",fA," f(B)=",fB)
```

5. Résultat de l'exécution du programme (visible dans la console / terminal) :

```
Génération n° 0
f(A//A)= 0.14285714285714285 f(A//B)= 0.8571428571428571 f(B//B)= 0
f(A)= 0.5714285714285714 f(B)= 0.42857142857142855
Génération n° 1
f(A//A)= 0.4 f(A//B)= 0.6 f(B//B)= 0
f(A)= 0.7 f(B)= 0.3
Génération n° 2
f(A//A)= 0.5384615384615384 f(A//B)= 0.46153846153846156 f(B//B)= 0
f(A)= 0.7692307692307692 f(B)= 0.23076923076923078
Génération n° 3
f(A//A)= 0.6249999999999999 f(A//B)= 0.375 f(B//B)= 0
f(A)= 0.8124999999999999 f(B)= 0.1875
Génération n° 4
f(A//A)= 0.6842105263157894 f(A//B)= 0.31578947368421056 f(B//B)= 0
f(A)= 0.8421052631578947 f(B)= 0.15789473684210528
Génération n° 5
f(A//A)= 0.7272727272727272 f(A//B)= 0.2727272727272726 f(B//B)= 0
f(A)= 0.8636363636363635 f(B)= 0.13636363636363638
Génération n° 6
f(A//A)= 0.76 f(A//B)= 0.24000000000000005 f(B//B)= 0
f(A)= 0.88 f(B)= 0.12000000000000002
Génération n° 7
f(A//A)= 0.7857142857142857 f(A//B)= 0.21428571428571433 f(B//B)= 0
f(A)= 0.8928571428571429 f(B)= 0.10714285714285716
Génération n° 8
f(A//A)= 0.8064516129032258 f(A//B)= 0.19354838709677422 f(B//B)= 0
f(A)= 0.9032258064516129 f(B)= 0.09677419354838711
Génération n° 9
f(A//A)= 0.8235294117647058 f(A//B)= 0.17647058823529413 f(B//B)= 0
f(A)= 0.9117647058823529 f(B)= 0.08823529411764706
```

On constate que la fréquence de l'allèle *B* a diminué au cours du temps, passant de 0,428 à 0,088 au bout de 9 générations.

Cette diminution de la fréquence allélique de *B* est le résultat de la sélection naturelle, les individus *B//B* mourant avant de pouvoir transmettre leurs allèles à la génération suivante (les individus hétérozygotes *A//B* continuent cependant de transmettre l'allèle *B*, ce qui explique qu'il n'ait pas totalement disparu au bout de 9 générations).

11 Estimer la biodiversité

1. Seule la réponse c. est correcte.

La richesse spécifique est définie par le nombre d'espèces différentes présentes dans l'écosystème.

Si on se limite aux espèces d'arbres (on ne dispose pas d'autres données), ces deux écosystèmes présentent la même richesse spécifique (4 espèces différentes d'arbres pour chaque écosystème).

2. Calcul des abondances relatives pour la chênaie (19 arbres au total) :

$$\text{Chêne vert} : A = \frac{6}{19} \times 100 = 32 \%$$

$$\text{Chêne pubescent} : A = \frac{4}{19} \times 100 = 21 \%$$

$$\text{Erable de Montpellier} : A = 32 \%$$

$$\text{Olivier} : A = 15 \%$$

Calcul des abondances relatives pour la pinède (22 arbres au total) :

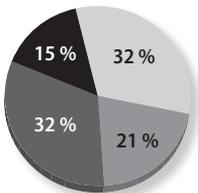
$$\text{Pin d'Alep} : A = \frac{12}{22} \times 100 = 54 \%$$

$$\text{Pin maritime} : A = \frac{8}{22} \times 100 = 36 \%$$

$$\text{Olivier} : A = \frac{1}{22} \times 100 = 5 \%$$

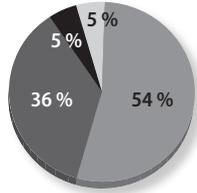
$$\text{Arbre de Judée} : A = 5 \%$$

Abondance relative des arbres dans la chênaie



■ chêne vert
■ chêne pubescent
■ érable de Montpellier
■ olivier

Abondance relative des arbres dans la pinède



■ pin d'Alep
■ pin maritime
■ olivier
■ arbre de Judée

3. Dans la pinède, deux espèces représentent à elles seules 90 % des arbres rencontrés. Les oliviers et arbres de Judée n'y sont représentés que de manière exceptionnelle, ce qui explique le caractère monotone de cet écosystème, comme le montre la photographie. À l'inverse, les 4 espèces d'arbres de la chênaie sont représentées de manière plus équilibrée. Bien que ces deux écosystèmes présentent la même richesse spécifique, on ne peut pas dire pour autant que leurs biodiversités sont comparables. On ne peut donc

pas résumer la biodiversité à la seule richesse spécifique, d'autres facteurs sont à prendre en compte, comme ici l'abondance relative des différentes espèces.

12 Prépa BAC Des mesures pour protéger le thon rouge

1. On constate dans le doc. d que l'effectif des thons a d'abord augmenté, entre 1968 et 1975, passant de 300 à 600 milliers de tonnes, puis a baissé jusqu'à se stabiliser autour de 300 milliers de tonnes en 1990. Depuis 2008, l'effectif augmente à nouveau, pour atteindre presque 500 milliers de tonnes en 2015.

2. Dès 2007 des mesures ont été prises pour limiter la surpêche (masse limite fixée à 30 kg en 2007, quota abaissé et pêche à la senne limitée en 2009).

Or, on a constaté que l'effectif des thons s'est mis à augmenter, après plus de 15 ans de stagnation, un an après ces mesures.

On peut donc supposer que cette augmentation est la conséquence de ces mesures, qui se sont donc montrées efficaces.

3. Le thon rouge ne passe pas l'intégralité de sa vie en Méditerranée comme le montre le doc. b. Les thons rouges de Méditerranée migrent dans l'océan Atlantique pour s'alimenter et reviennent dans les zones de reproduction méditerranéennes. La surpêche du thon en Atlantique compromet ainsi, à court terme, la régénération des populations. Si l'on veut que les mesures de protection soient efficaces, elles doivent concerner l'intégralité de son habitat et donc également l'océan Atlantique.

4. Pour estimer l'effectif, on utilise la méthode décrite dans l'activité 2 et on applique la formule suivante :

$$N = n \times \frac{m_0}{m} = 300 \times \frac{200}{15} = 4\,000$$

On peut estimer l'effectif de la population de thons à 4 000 individus.

L'évolution comme grille de lecture du monde

LE PROGRAMME

3.2 – L'évolution comme grille de lecture du monde

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.</p> <p>L'évolution permet de comprendre des phénomènes biologiques ayant une importance médicale.</p> <p>L'évolution rapide des organismes microbiens nécessite d'adapter les stratégies prophylactiques, les vaccins et les antibiotiques.</p> <p>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).</p> <p>Interpréter des caractéristiques anatomiques humaines en relation avec des contraintes historiques (comme le trajet de la crosse aortique), des contraintes de construction (comme le tétou masculin), des compromis sélectifs (comme les difficultés obstétriques) ou des régressions en cours (comme les dents de sagesse).</p> <p>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>
Prérequis et limites	
Il n'est pas attendu de développement spécifique en matière d'embryologie ou d'agronomie.	

► SITUATION 1

La sélection naturelle est un des mécanismes fondamentaux de l'évolution. Il paraît donc essentiel de commencer par remobiliser ce concept étudié en classe de 2^{nde}.

► Exemple de réponse attendue

La sélection naturelle a lieu dès que 3 conditions sont réunies :

1. Il y a des variations entre les individus d'une même population.
2. Ces variations sont au moins en partie hérissables.
3. Ces variations sont corrélées à des variations de succès reproducteur.

Ainsi, de manière automatique, la sélection naturelle produit des adaptations.

► En classe de T^{le} enseignement scientifique

Dans ce chapitre intitulé « L'évolution comme grille de lecture de monde » le concept de sélection naturelle sera manipulé à nombreuses reprises, ainsi que ceux d'adaptation et de mal-adaptation.

► SITUATION 2

Parmi les pratiques humaines étudiées *via* le prisme de l'évolution, la santé est un exemple intéressant. En effet, c'est un domaine fondamental pour nos sociétés et une approche évolutive apporte un regard nouveau essentiel aux défis sanitaires contemporains. Ce document permet de remobiliser certaines connaissances en particulier sur l'action des vaccins.

► Exemple de réponse attendue

Les virus et les bactéries sont des micro-organismes dont certains sont pathogènes pour l'être humain. Les bactéries sont des êtres vivants unicellulaires. Les virus sont des structures moléculaires très simples qui sont des parasites cellulaires obligatoires.

Les antibiotiques sont des molécules qui tuent les bactéries ou les empêchent de se reproduire. Ils empêchent donc les infections bactériennes. Les vaccins sont des mélanges contenant entre autres un agent infectieux (parties de virus ou de bactéries) sous une forme inoffensive mais qui stimule tout de même une réponse immunitaire de l'organisme. Celui-ci devient alors immunisé contre l'agent infectieux utilisé.

► En classe de T^{le} enseignement scientifique

Les effets des actions humaines sur les résistances aux antibiotiques et aux vaccins sont étudiés au sein de l'activité 3. Cette étude permet d'envisager des modifications des gestes sanitaires pour mieux préparer l'avenir.

► SITUATION 3

L'autre pratique humaine étudiée dans ce chapitre est l'agriculture. Cette situation permet de remobiliser le concept d'agrosystème étudié en classe de 2^{nde}.

► Exemple de réponse attendue

L'agrosystème est un écosystème, c'est-à-dire un ensemble d'êtres vivants en interaction entre eux et avec leur milieu. Néanmoins c'est un écosystème particulier car les humains y interviennent beaucoup pour y réaliser des apports de matière (matière organique et minérale, par exemple de l'eau, des engrais, des pesticides) et des actions coûteuses en énergie (utilisation de machines agricoles). L'objectif étant d'augmenter la productivité de l'agrosystème et d'en exporter la quasi-totalité de la matière organique produite. Cette exportation massive appauvrit le système et doit donc être compensée par ces apports.

Au contraire, dans un écosystème naturel, la productivité est moindre et l'essentiel de la biomasse produite est recyclée au sein du système.

► En classe de T^{le} enseignement scientifique

Les pratiques humaines liées à l'agriculture sont là encore décryptées *via* le prisme évolutif. Cela permet de comprendre les conséquences de certaines actions comme l'apparition de résistances à des produits phytosanitaires ou la diminution de la biodiversité et d'envisager des modifications des pratiques encore une fois pour mieux préparer l'avenir.

ACTIVITÉS

Dans les programmes antérieurs, l'évolution est étudiée le plus souvent *via* la macroévolution et parfois la microévolution.

L'approche macroévolutive conduit à aborder les arbres de parentés, l'étude des peuplements au cours de l'histoire de la Terre, les crises biologiques et les radiations adaptatives, les phénomènes de spéciation.

La microévolution est abordée *via* l'étude des processus évolutifs (sélection naturelle et dérive génétique) principalement pour expliquer des variations de fréquence d'allèles ou de phénotypes dans des populations sous l'effet de pressions de sélection. Une approche de la spéciation *via* les processus évolutifs (en classe de 2^{nde}) permet de lier macroévolution et microévolution. L'espèce humaine est étudiée à travers l'histoire de sa lignée et un peu en interaction avec les mécanismes évolutifs (en 1^{re} spécialité SVT).

Le concept d'adaptation lié à la sélection naturelle n'est pas abordé de manière explicite dans les programmes antérieurs. Le programme d'enseignement scientifique de T^{ale} est ambitieux au regard de ce panorama car il propose une approche évolutive centrée sur l'adaptation à la fois de l'anatomie et du fonctionnement des êtres vivants dont l'humain ainsi qu'un décryptage évolutif d'actions humaines. En ce sens, il donne corps à la célèbre phrase de Theodosius Dobzhansky (1900-1975) : « Rien en biologie n'a de sens, si ce n'est à la lumière de l'évolution ».

Ce chapitre permet par ailleurs de construire des arguments pour contrer, d'une part les personnes encore nombreuses qui réfutent l'évolution et, d'autre part, celles qui considèrent que sélection naturelle et dérive génétique ont le même pouvoir explicatif du vivant.

Les personnes qui réfutent l'évolution utilisent divers arguments fallacieux dont celui de l'existence d'organes complexes que la science n'arriverait pas à expliquer. Le propos de ce chapitre est donc d'étudier l'évolution d'un organe complexe (l'exemple de l'œil) pour montrer que la science et l'évolution expliquent de manière rigoureuse, cohérente et satisfaisante l'existence d'organes complexes.

La sélection naturelle et l'adaptation sont souvent caricaturées comme des processus qui devraient produire des êtres vivants parfaits ! Or, le vivant regorge de défauts et l'existence de ces défauts est parfois utilisée comme arguments par ceux qui réfutent l'importance de la sélection naturelle dans la structuration du vivant tel qu'il est aujourd'hui. Or, sélection naturelle et adaptation ne produisent pas de la perfection mais bien des adéquations entre des formes, structures et dynamiques et les fonctions qu'elles remplissent. Le propos de ce chapitre est de chercher dans l'histoire évolutive des êtres vivants les causes possibles à certains de ces défauts encore appelés mal-adaptations.

L'histoire évolutive de l'œil humain

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 ».

Savoir-faire : « 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) ».

L'activité étudie l'œil humain, ses adaptations et mal-adaptations et son histoire évolutive.

Le **document 1** présente deux types d'œil : l'œil des humains (doc. 1a) et l'œil des céphalopodes (doc. 1b). Ils présentent de nombreux points communs mais aussi des différences. Parmi les différences, notons le sens de la rétine et la présence ou non de la tache aveugle.

L'œil humain est globalement une adaptation, c'est-à-dire une structure qui présente une adéquation entre son organisation et son fonctionnement. Cela ne veut pas dire que cette structure est parfaite. Elle présente en effet quelques mal-adaptations comme la rétine inversée (illustrée par une animation *Edumedia* montrant le trajet de la lumière et des signaux nerveux) et la tache aveugle due au passage des fibres optiques de l'intérieur de l'œil à la zone cérébrale.

Une adaptation est donc une structure qui fonctionne bien mais cela ne signifie pas du tout qu'elle soit parfaite.

L'œil des humains et celui des céphalopodes sont apparus de manière indépendante dans l'évolution. Cela renforce l'idée que, par l'évolution, des organes complexes peuvent apparaître sans aucun problème.

Le **document 2** présente justement un scénario de développement de l'œil humain au cours de l'évolution. Il utilise les résultats d'un article scientifique très connu et qui peut facilement être étudié avec des élèves (*A Pessimistic Estimate of the Time Required for an Eye to Evolve*, Dan-E. Nilsson and Susanne Pelger, *Proc. R. Soc. Lond. B* 1994 256, 53-58). Les scientifiques arrivèrent à modéliser

un œil semblable à celui des humains en 1829 étapes. Une étape est constituée de la production de variants au hasard, puis de la sélection de la variation qui améliore le plus les propriétés optiques de la structure. Ainsi, une structure anatomique telle que l'œil peut être expliquée en mobilisant les concepts de hasard, de variation, de sélection naturelle et d'adaptation.

Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Avec une étape par génération et une génération par an, il faudrait 1 829 années pour évoluer vers un œil complexe.
- Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour les cas envisagés ensuite (résultats exprimés en années) :

	Une étape par génération	Une étape toutes les 10 générations	Une étape toutes les 100 générations
Une génération de 1 an	1 829	= 1 829 × 10 = 18 290	= 1 829 × 100 = 182 290
Une génération de 5 ans	= 1 829 × 5 = 9 145	= 1 829 × 5 × 10 = 91 450	= 1 829 × 5 × 100 = 914 500
Une génération de 10 ans	= 1 829 × 10 = 18 290	= 1 829 × 10 × 10 = 182 290	= 1 829 × 10 × 100 = 1 822 900
Une génération de 20 ans	= 1 829 × 20 = 36 580	= 1 829 × 20 × 10 = 365 800	= 1 829 × 20 × 100 = 3 658 000

• Si les chercheurs estiment que des yeux comme les nôtres auraient pu apparaître 1 500 fois en 550 millions d'années, on peut dire qu'il faudrait $\frac{550 \times 10^6}{1 500} = 366 666$ ans pour produire une fois des yeux comme les nôtres grâce à l'évolution. On voit que cela correspond aux conditions d'une étape franchie toutes les 10 générations avec un temps de génération de 20 ans soit une étape tous les 200 ans. Leur affirmation est donc acceptable.

Remarques :

• Dans l'hypothèse d'une évolution la plus rapide (1 étape par génération et une génération par an), des yeux comme les nôtres auraient pu apparaître $\frac{550 \times 10^6}{1 829} = 300 710$ fois !

• Dans l'hypothèse d'une évolution la plus lente (1 étape toutes les 100 générations et une génération de 20 ans), des yeux comme les nôtres auraient pu apparaître $\frac{550 \times 10^6}{3,658 \times 10^6} = 150$ fois ce qui reste une valeur élevée !

On a ici l'occasion de montrer aux élèves qu'avec du temps, les événements les plus improbables (ici une suite de mutations conduisant à un organe complexe) peuvent se réaliser.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Les deux principaux défauts de l'œil humain sont la rétine inversée et la tache aveugle. Dans la rétine inversée, les photorécepteurs sont placés sous des couches de cellules et sont orientés

vers le fond de l'œil au lieu d'être orientés vers la source de lumière. La tache aveugle est la zone de la rétine dépourvue de photorécepteurs car au niveau de cette zone les fibres nerveuses qui sortent de la rétine vers l'intérieur de l'œil (contrairement à l'œil des céphalopodes) convergent vers le cortex.

2. Une évolution par sélection naturelle a lieu dès que 3 conditions sont réunies : 1. Il existe des variants dans la population pour un caractère donné. 2. Ces variations sont au moins en partie héréditaires. 3. Ces variations sont responsables d'une variation de succès reproducteur. Ici, ces trois conditions sont réunies : le modèle génère des variants et ces variations sont transmises aux descendants, les variants qui ont des structures avec les meilleures particularités optiques sont ceux qui se reproduisent plus que les autres. Ainsi, les 3 conditions sont remplies, c'est bien une évolution par sélection naturelle.

3. Les principaux défauts de l'œil humain sont la rétine inversée et la tache aveugle. Ces deux caractéristiques sont provoquées par l'orientation initiale et aléatoire des photorécepteurs chez l'ancêtre possédant les proto-yeux.

4. La modélisation consiste en une représentation simplifiée, ici mathématique, de la réalité d'un phénomène. Les modèles décrivent et prédisent des événements. Les observations permettent de dire si les prédictions et descriptions des modèles correspondent à une réalité connue ou non. Ainsi, le modèle de Nilsson et Pelger prédit un état initial et certaines étapes intermédiaires. Or, dans le

vivant, des yeux « initiaux » sont connus et décrits (par exemple chez la planaire). Ces éléments existants sont des arguments permettant de conforter la fiabilité du modèle proposé. Si un modèle au contraire prédit et décrit des éléments non connus, sa fiabilité sera alors jugée assez faible.

p. 216 ■ **ACTIVITÉ 2**

L'anatomie humaine vue par l'évolution

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 ».

Savoir-faire : « Interpréter des caractéristiques anatomiques humaines en relation avec des contraintes historiques (comme le trajet de la crosse aortique), des contraintes de construction (comme le tétón masculin), des compromis sélectifs (comme les difficultés obstétriques) ou des régressions en cours (comme les dents de sagesse) ».

Dans cette activité, chaque document permet d'aborder successivement un exemple cité dans le programme :

- présence de tétons chez les hommes (**document 1**) ;
- trajet du nerf laryngé (**document 2**) ;
- dents de sagesse en régression (**document 3**) ;
- difficultés obstétriques (**document 4**).

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Un tel scénario commencerait avec l'apparition par hasard d'un homme sans tétons. Cette absence de tétons serait due à une modification génétique (par exemple sur un gène de développement) et serait donc héréditaire. Cet homme sans tétons serait apprécié des femmes (sélection sexuelle) et auraient plus de descendants en moyenne qu'un homme avec tétons. Ainsi, de générations en générations, la fréquence des hommes sans tétons augmenterait jusqu'à constituer l'ensemble de la population masculine.

2. L'apparition du cou a provoqué un éloignement entre le cerveau et le cœur. Deux solutions

auraient été possibles : que le nerf laryngé ne passe plus sous la crosse aortique ou que le nerf laryngé s'allonge. On voit que cette deuxième solution est plus simple (« nécessitant » probablement moins de modifications de l'expression des gènes impliqués dans le développement de cette partie du corps) et donc évolutivement pertinente.

3. Certains caractères pourraient être en cours de régression comme l'appendice (dont l'inflammation est responsable de l'appendicite) ou le cinquième orteil.

4. La médecine moderne permet de recourir aux césariennes en cas de difficultés d'accouchement. Cette possibilité médicale diminue la pression de sélection liée au passage de la tête du bébé à travers le bassin féminin. Or, la pression de sélection sur l'étroitesse de l'ouverture du bassin pour une meilleure bipédie étant toujours présente, on pourrait observer une évolution vers des bassins plus étroits chez les femmes.

p. 218 ■ **ACTIVITÉ 3**

Évolution et santé

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 ».

Savoir-faire : « Mobiliser des concepts évolutionnistes pour expliquer comment des populations microbiennes pourront à longue échéance ne plus être sensibles à un vaccin ou un antibiotique ».

Cette unité se focalise sur l'antibiorésistance (**document 1a**) qui est un enjeu majeur de santé publique car les gestes individuels et collectifs doivent être compris pour être adoptés de manière à limiter le développement des résistances bactériennes visibles sur l'exemple du **document 1b**.

La comparaison avec les résistances aux vaccins (**document 2**) permet de remobiliser de nombreuses connaissances et d'illustrer une stratégie permettant de limiter l'antibiorésistance. Une animation *Edumedia* permet de rappeler rapidement l'intérêt des vaccins.

D'autres stratégies sont présentées par le **document 3**.

Remarque : l'antibiorésistance est une problématique connue des élèves ayant suivi l'enseignement de spécialité SVT en classe de 1^{re}.

doc

1 Pour mener une investigation

Exemple de correction

Le site <https://resistancemap.cddep.org/AntibioticResistance.php> permet d'explorer et d'établir des corrélations entre de nombreuses familles d'antibiotiques et différents agents pathogènes, pour divers pays en fonction du temps. L'exemple des USA peut être exploité en étudiant les antibiotiques comme les aminoglycosides, les fluoroquinolones ou les céphalosporines. Cependant, il est intéressant de laisser ici toute liberté aux élèves de recherches et d'analyses car ils seront confrontés à différentes situations (hausse ou baisse d'une antibiorésistance corrélée positivement ou négativement à une hausse ou baisse de la consommation de tel ou tel antibiotique) pour lesquelles ils pourront proposer différentes hypothèses explicatives (mise en place d'une campagne de lutte contre l'antibiorésistance, remplacement d'un traitement par un autre etc.). Les élèves sont invités à exploiter la fiche d'aide « Distinguer causalité et corrélation » à la page 11 du manuel.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Le graphique 1b montre l'utilisation des carbapénèmes et la résistance de *Klebsiella pneumoniae* à ces carbapénèmes entre 2000 et 2015. On observe que l'utilisation de ces antibiotiques augmente au cours du temps. On observe une stabilisation à partir de 2012. Entre 2000 et 2011, la résistance à ces antibiotiques n'est pas connue mais elle apparaît en 2011. Si une mutation conférant une résistance à ces antibiotiques apparaît par hasard, en présence de l'antibiotique, elle sera sélectionnée. Donc l'apparition de la résistance aux carbapénèmes en 2011 est bien provoquée par l'utilisation de ces carbapénèmes. C'est bien une relation de causalité.

On peut supposer que la stabilisation de la consommation des carbapénèmes observée à partir de 2011 est corrélée avec l'apparition de cette résistance soit car leur utilisation est moins pertinente car en partie inefficace, soit car une stratégie de lutte a été mise en place pour réduire l'émergence de cette antibiorésistance.

2. Puisque l'utilisation des vaccins est une alternative à l'utilisation des antibiotiques (dans certains cas), alors favoriser les stratégies vaccinales

permet de limiter l'utilisation des antibiotiques et cela aura pour conséquence directe une diminution de la résistance des bactéries aux antibiotiques.

3. Toutes les mesures permettent d'utiliser au mieux les antibiotiques pour limiter les utilisations non pertinentes et donc limiter l'apparition et le développement des résistances.

Par exemple :

- Ne les utiliser que contre des bactéries et pas en cas de maladie virale (comme la grippe).
- Utiliser l'antibiotique qui fonctionne le mieux contre la bactérie qui pose problème.
- Les antibiotiques à spectre large sont réservés dans les cas où plusieurs bactéries sont en cause ou que l'agent bactérien n'est pas connu.
- Ne pas suivre les indications de doses et de durées (par exemple arrêter le traitement avant sa fin) peut provoquer le développement de résistance. Il est donc très important de suivre les traitements prescrits par les médecins.

p. 220 ■ ACTIVITÉ 4

Évolution et agriculture

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « 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. »

Savoir-faire : « Mobiliser des concepts évolutionnistes pour expliquer comment l'utilisation de produits phytosanitaires favorise le développement de ravageurs des cultures qui y sont résistants. »

Cette activité couvre des éléments divers comme la domestication (**document 1**), la monoculture (**document 2**) et l'utilisation des produits phytosanitaires (**document 3**). Elle envisage les effets sur la biodiversité (doc. 1 et doc. 2) et sur les résistances des ravageurs (doc. 3). Les concepts de sélection naturelle, de sélection artificielle et de dérive génétique sont mobilisés.

Remarque : les notions associées à la domestication sont également abordées en classe de T^{ale} spécialité SVT.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Dans les années 1100, une mutation est apparue par hasard chez une poule. Cette mutation

a eu pour effet une ponte plus abondante, une ponte répartie sur une plus grande partie de l'année et une sociabilité accrue entre les poules. Ce dernier caractère est important, il aura permis de conserver plus de poules au même endroit. Ces caractères sont tout à fait favorables pour l'élevage par les humains. Ces derniers ayant détecté ces avantages ont fait en sorte que les poules présentant ces caractères se reproduisent plus que les autres (sélection artificielle s'appuyant sur les mêmes principes que la sélection naturelle mais avec une pression de sélection orientée par les actions humaines). Au cours du xx^e siècle, la sélection artificielle s'est poursuivie et le nombre moyen d'œufs par poule a encore augmenté (environ 150 en 1950 contre environ 300 en 2019). Cette domestication s'est accompagnée d'une baisse de diversité génétique au sein des populations de poules pondeuses d'élevage par rapport aux populations ancestrales.

2. À grande échelle, le développement des monocultures d'un nombre restreint de lignées participe à l'effondrement du nombre de variétés effectivement cultivées. Localement, la production de la même culture sur les mêmes parcelles plusieurs années de suite peut être responsable d'une diminution de la qualité des sols, d'une diminution de la biodiversité (voir graphiques de la diversité des abeilles, des oiseaux, des plantes et des arthropodes herbivores) et du développement plus important de pathogènes (doc. 3).

Au contraire, maintenir une diversité sur les parcelles favorise la variabilité phénotypique et est donc un facteur de réduction de la vulnérabilité aux intempéries ou aux bioagresseurs.

Plus généralement, la diversité génétique des espèces apparentées sauvages ou des variétés cultivées traditionnelles (doc. 1) est une source de diversité dans laquelle les chercheurs peuvent puiser des allèles présentant des avantages agronomiques. C'est ainsi que le riz a été sauvé du virus du rabougrissement herbeux ou la vigne française du puceron *phylloxera*. Finalement la réduction de la diversité, tant au niveau local qu'au niveau global, constitue une prise de risque pour notre sécurité alimentaire à long terme.

3. Pour envisager des stratégies agricoles afin de limiter la résistance aux ravageurs, on peut s'inspirer des stratégies sanitaires pour limiter les antibiorésistances :

- rationaliser l'utilisation de ces produits en utilisant les bons produits aux bons endroits et aux bons moments ;

- favoriser les actions alternatives liées aux pratiques culturelles, à la lutte physique ou à la lutte biologique ;
- suivre l'évolution des résistances afin de mieux les connaître.

Pour limiter l'érosion de la biodiversité, on peut envisager de :

- limiter les monocultures et de favoriser des systèmes plus intégrés comme l'agroforesterie ;
- favoriser les rotations dans le temps ;
- protéger les zones d'origine des plantes ancestrales.

CORRECTION DES EXERCICES

p. 225 ■

Vérifier ses connaissances

1 Question à réponse unique

A-1

La sélection naturelle sélectionne positivement les variations des caractères des individus d'une population qui sont les plus adaptées à une contrainte environnementale donnée. En effet, ces variations amènent ces individus à mieux survivre et/ou mieux se reproduire. Ainsi, génération après génération, il en découle automatiquement une adéquation entre la forme des êtres vivants et leur milieu de vie, ou la forme des organes ou molécules et leurs fonctions. Ces adéquations sont appelées des adaptations. Parfois, l'évolution est trop lente pour produire les adaptations nécessaires face à un environnement changeant trop brutalement. Les caractères deviennent inadaptés, on peut alors parler d'anachronisme évolutif.

B-3

Une contrainte peut être à l'origine d'une mal-adaptation. C'est par exemple le cas du trajet du nerf laryngé.

Variation (des caractères) et pression de sélection (de l'environnement) sont à l'origine de la sélection naturelle qui produit des adaptations.

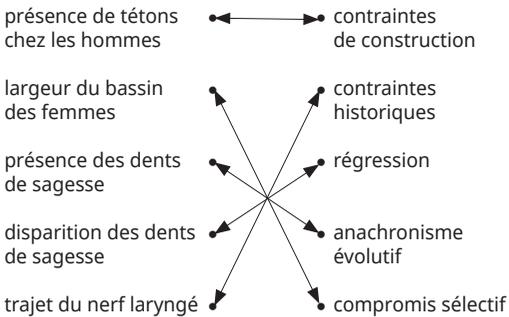
C-1

La sélection naturelle retient les caractères qui permettent une meilleure survie et une meilleure reproduction. Si un organisme résistant à un pesticide apparaît alors que ce pesticide est utilisé alors cet organisme se reproduira davantage que les individus sensibles transmettant ainsi cette résistance à la génération suivante où sa fréquence augmentera. Ainsi, la résistance à des pesticides est provoquée par la sélection naturelle.

2 Reformuler des notions essentielles

- Un organe complexe résulte d'une accumulation de variations utiles.
- L'œil humain est une adaptation qui a été produite par la sélection naturelle.
- Des mal-adaptations peuvent être dues à des compromis ou à des contraintes évolutives.
- La gestion des problématiques de résistance aux antibiotiques est un enjeu majeur de santé publique.

3 Mettre en relation ses connaissances



La présence de tétons chez les hommes peut être le résultat de contraintes de construction puisque ces tétons sont nécessaires chez les femmes pour allaiter les bébés.

La largeur du bassin des femmes est un compromis sélectif ; en effet le bassin féminin doit être assez large pour permettre le passage de la tête du nouveau-né et assez étroit pour assurer la locomotion bipède de la mère.

La présence des dents de sagesse est un anachronisme évolutif. En effet, ces dents posent aujourd'hui plus de problèmes, qu'elles ne sont utiles. Elles étaient utiles dans un environnement qui n'est plus le nôtre aujourd'hui. D'ailleurs, elles tendent à disparaître. On parle de régression évolutive.

Le trajet du nerf laryngé est une mal-adaptation due à une contrainte historique. En effet, chez notre ancêtre qui n'avait pas de cou, le trajet le plus court du cerveau au larynx était bien celui qui passait sous la crosse aortique mais ce n'est plus le cas chez les descendants.

4 Retour sur les problématiques

• **Comment l'évolution permet-elle d'expliquer, notamment chez l'être humain, l'existence de structures anatomiques complexes ou au contraire apparemment sans intérêt biologique ?**

La sélection naturelle est responsable des adaptations, c'est-à-dire des structures qui sont en adéquation avec leur fonction. Néanmoins, la sélection naturelle ne produit pas des structures parfaites et ce pour différentes raisons. Ainsi, les contraintes de construction ou historique ainsi que les compromis adaptatifs peuvent expliquer des mal-adaptations.

L'œil humain est un organe complexe, belle adaptation globale à la vision produite par sélection naturelle. Néanmoins, cet organe n'est pas parfait et présente des mal-adaptations comme sa rétine inversée ou sa tache aveugle. Ces deux mal-adaptations s'expliquent par l'histoire évolutive de cette structure. Le trajet du nerf laryngé chez l'Homme s'explique également par une contrainte historique. Par contre, la présence des tétons chez les hommes s'expliquerait par une contrainte de construction. En revanche, la largeur du bassin féminin est un compromis sélectif entre être assez large pour permettre le passage de la tête du bébé mais assez étroite pour permettre la locomotion bipède. Quant aux dents de sagesse, elles sont un anachronisme évolutif et sont en cours de régression.

• **Comment l'évolution permet-elle de comprendre certains phénomènes majeurs dans des domaines aussi fondamentaux pour l'être humain que la santé et l'agriculture ?**

Parmi les enjeux majeurs des domaines de la santé et de l'agriculture figure la gestion des résistances aux pesticides ou aux antibiotiques. Or, dans les deux cas, ces résistances se répandent par sélection naturelle dans des environnements où ces substances sont utilisées. Connaissant le processus d'évolution par sélection naturelle, il est possible d'agir pour limiter l'apparition de ces résistances.

Ainsi, n'utiliser les antibiotiques que lorsque cela est nécessaire, bien choisir entre un antibiotique à spectre large ou à spectre étroit, utiliser la dose optimale et pendant le temps nécessaire, sont autant de pistes pour mieux utiliser les antibiotiques.

De plus, des pratiques agricoles diminuant les diversités génétiques des espèces cultivées ou élevées posent des problèmes de vulnérabilité (voir exemple de la pomme de terre et de l'infection au mildiou en Irlande) et de moindre capacité d'adaptation. De même, il est possible d'agir afin de préserver voire d'enrichir le pool génétique des espèces utilisées en agriculture et ainsi agir pour préserver notre sécurité alimentaire.

5 Restituer les notions essentielles du cours

a. Certaines structures anatomiques sont mieux expliquées par l'héritage de l'histoire évolutive que par leur fonction.

Par exemple, l'œil est l'organe de la vision chez l'Homme. Pourtant, au centre de la rétine, se trouve un endroit sans photorécepteur. C'est l'endroit où les fibres sensibles se rejoignent pour former le nerf optique. Cette tache aveugle est une mal-adaptation qui s'explique par l'histoire évolutive de cet organe. En effet, lorsque la rétine s'est courbée au cours de l'évolution, les fibres optiques étaient orientées vers l'intérieur de la courbure et non vers l'extérieur comme chez les céphalopodes d'où la formation de la tache aveugle.

Voir la comparaison de l'organisation de l'œil chez l'humain et les céphalopodes de l'activité 1 (doc. 1a et 1b p. 214).

Le trajet du nerf laryngé est un autre exemple parlant. Chez l'ancêtre commun des mammifères, le chemin le plus court du cerveau au pharynx passait sous la crosse aortique. Lorsque le cou est apparu, éloignant le cœur du cerveau, l'évolution a sélectionné une augmentation de la longueur du nerf laryngé plutôt qu'une modification de son trajet. La situation actuelle peut ainsi paraître absurde ! Elle s'explique donc par des facteurs historiques.

b. Des populations microbiennes peuvent ne plus être sensibles à un antibiotique.

Si un antibiotique est appliqué sur une population de bactéries au sein de laquelle certaines sont sensibles et d'autres (même un très petit nombre) sont par hasard résistantes, alors l'antibiotique va tuer les bactéries sensibles. Les bactéries résistantes seront les seules à se reproduire et la population de la génération suivante sera alors majoritairement constituée de bactéries résistantes. Ainsi, une population bactérienne peut, par sélection naturelle, ne plus être sensible à un antibiotique. Le temps entre l'utilisation d'un antibiotique et l'apparition des premières résistances est souvent assez court. Or, de nombreuses maladies mortelles sont provoquées par des bactéries et la découverte, puis l'utilisation massive des antibiotiques, a été la révolution sanitaire majeure du ^{xx}e siècle. La gestion des résistances aux antibiotiques est donc un enjeu majeur de santé publique.

c. Certaines pratiques agricoles impactent la biodiversité et son évolution.

Les pratiques agricoles comme la domestication ou la monoculture diminuent la diversité

génétique des individus utilisés. Or, la diversité génétique est un moteur de l'évolution. Ainsi, en la réduisant, les pratiques agricoles impactent directement l'évolution de ces populations animales et végétales agricoles.

Par exemple, les capacités d'adaptation des espèces domestiquées sont fortement réduites. Cette fragilité de nos systèmes agricoles menace directement notre sécurité alimentaire.

6 Reconstituer une histoire évolutive

a. Les étapes sont dans l'ordre suivant : C / A / E / B / D.

Au cours de cette histoire évolutive, les propriétés optiques sont d'abord améliorées par le creusement de la structure (étapes C à E), puis par la constitution d'un cristallin (étape B), puis par l'aplatissement de celui-ci (étape D).

b. Hasard, variation et sélection se produisent entre chaque étape, soit dans ce modèle simplifié 5 fois (avant C, puis entre C et A, puis entre A et E, puis entre E et B, puis entre B et D). Ainsi, l'évolution d'un organe complexe consiste en une succession d'étapes élémentaires. Chaque étape est la conséquence d'une variation (mutation) modifiant par hasard et légèrement la structure. Les variations qui produisent une structure plus fonctionnelle, apportant un bénéfice à l'individu, permettra à celui-ci de mieux se reproduire que les autres et la structure sera ainsi sélectionnée.

p. 226 ■

Exercice similaire

8 Comparer des vitesses d'apparition de résistance à des insecticides

1. Pour estimer la vitesse (v) d'apparition d'une résistance à un insecticide (ici nombre d'espèces étudiées = 1), il faut connaître la date de première utilisation de l'insecticide (date 1) et la date de la première observation d'une résistance chez une espèce d'insecte (date 2).

$$v = \frac{1}{(\text{date } 2 - \text{date } 1)}$$

2. En étudiant le graphique, on remarque que plus le nombre de générations par an chez une espèce d'insecte est important et plus le temps nécessaire à l'apparition d'une résistance est faible.

Par exemple, il faut 20 ans pour qu'une résistance apparaisse chez *M. tamsuyensis* dont le temps de génération est de 1,8 an ($\frac{1}{0,55}$) alors que pour

Hylamay sp1, par exemple, dont le temps de génération est de 4 mois (soit 3 générations par an), il suffit de 5 ans pour qu'une résistance apparaisse.

3. Plus le nombre de générations par an est grand, plus le nombre d'évènements de reproduction pour passer d'une génération à la suivante est grand et donc plus le nombre de variants apparaissant par hasard sera également grand. La probabilité qu'un variant résistant apparaisse augmente donc aussi.

Ainsi, plus le nombre de générations par an est élevé, plus la probabilité d'apparition d'un variant résistant à l'insecticide est élevée et plus le temps nécessaire à l'apparition d'une résistance est faible.

p. 227 ■

S'entraîner

9 La dissémination des graines

1. Les fruits ont été façonnés par la sélection naturelle parce qu'ils permettent la dispersion des graines des plantes par des animaux qui les ingèrent et rejettent les graines ailleurs dans leurs excréments. Ainsi, les fruits doivent être juste assez solides pour ne pas être ouverts et mangés par des animaux de petite taille dont le comportement ne permettrait pas une dispersion à grande distance, mais pas trop solides pour pouvoir être ouverts par de gros animaux, mobiles sur de grandes distances.

2. Ces fruits ont évolué dans un environnement dans lequel il y avait des animaux de très grande taille (la mégafaune). La sélection naturelle a donc façonné chez eux une coque très dure que seuls ces animaux pouvaient ouvrir. Dans un nouvel environnement, dans lequel la mégafaune avait disparu, les caractéristiques de ces fruits se trouvaient donc être mal-adaptées car, sans animal pouvant casser leur carapace, les graines ne pouvaient être dispersées, impliquant ainsi la disparition de l'espèce. La carapace dure du fruit serait alors devenu un anachronisme évolutif, c'est-à-dire un caractère adapté à la présence de la mégafaune du Pléistocène, mais devenu inadapté après la disparition des grands Mammifères. L'introduction du cheval, seul animal actuel pouvant ouvrir cette coque a permis de maintenir cette adaptation et la reproduction de l'arbre.

10 Évolution et lutte contre les cancers

Une thérapie adaptative consiste en une alternance de phases avec traitement et sans traitement. Durant la phase de traitement, les cellules

résistantes sont avantagées par la pression de sélection et augmentent donc en fréquence, mais le traitement est dosé de telle sorte que toutes les cellules sensibles ne disparaissent pas. Durant la phase d'interruption du traitement, les cellules sensibles sont alors avantagées par rapport aux cellules résistantes, elles entrent en compétition avec elles et empêchent donc leur trop grande multiplication. Lors de la reprise du traitement, ces cellules sensibles sont de nouveau partiellement éliminées, et ainsi de suite. La tumeur est ainsi contrôlée, mais pas éliminée. La thérapie adaptative utilise en quelque sorte les cellules sensibles comme un allier thérapeutique pour entrer en compétition avec les cellules résistantes et empêcher leur prolifération.

11 La résistance aux plantes génétiquement modifiées

1. d.
2. c.
3. b.
4. b.

12 Le risque de « fausse route »

Si l'évolution était un ingénieur, elle aurait sélectionné des voies digestive et aérienne complètement séparées. Il n'y a aucune raison fonctionnelle à ce que ces voies se croisent, mais l'évolution n'est pas un ingénieur. C'est un bricoleur. Elle agit par accumulation graduelle de mutations adaptatives aléatoires ayant de légères conséquences sur ce qui existe déjà. Par exemple, les poumons ont évolué au départ chez des poissons osseux dotés de branchies, respirant donc majoritairement dans l'eau. Ils permettaient à ces poissons de réaliser quelques échanges gazeux dans l'air, ce qui conférait un avantage sélectif durant les périodes de sécheresse. La solution sélectionnée pour créer cette surface d'échange a consisté à utiliser un système préexistant (entrée de l'air dans l'organisme et surface très irriguée) : le tube digestif. Les premiers poumons n'étaient donc qu'une invagination du tube digestif. Le fait que cette solution puisse entraîner, des millions d'années plus tard, des problèmes de fausse route n'entre absolument pas en ligne de compte à ce moment-là. La sélection naturelle n'est liée qu'aux effets immédiats des mutations et à l'environnement à un moment donné. L'hypothèse est donc que la mal-adaptation du croisement entre les voies respiratoires et digestives résulte d'une contrainte historique.

1. La vaccination fait chuter drastiquement l'incidence de la maladie dans les populations les plus exposées : les moins de 2 ans et les plus de 65 ans (les personnes dont le système immunitaire est encore immature ou bien affaibli).

2. Dans une période où seuls les antibiotiques sont utilisés pour lutter contre cet agent pathogène, le nombre de souches résistantes augmente considérablement (de 0 à 50 % entre 1985 et 2000).

La vaccination permet de limiter la prolifération de ces bactéries et le nombre de malades.

Du fait qu'il y a moins de malades, la pénicilline est moins utilisée contre les pneumocoques. La pression de sélection favorisant la résistance est donc plus faible. La fréquence des bactéries résistantes diminue donc.

3. La vaccination a un effet très fort en termes de santé publique, à la fois parce qu'elle permet de réduire l'incidence de la maladie (docs a, d et e) et donc de sauver des vies, mais aussi parce qu'elle permet de limiter l'utilisation des antibiotiques et donc l'évolution de la résistance (doc. c). De ce fait, les antibiotiques restent efficaces dans les situations critiques où ils sont nécessaires.

L'évolution humaine

LE PROGRAMME

3. Une histoire du vivant

3.3 – L'évolution humaine	
<p>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.</p>	
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. 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. L'étude de fossiles datés de 3 à 7 millions d'années montre des innovations caractéristiques de la lignée humaine (bipédie prolongée, forme de la mandibule). 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. 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.</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>
Prérequis et limites	
<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>	

► SITUATION 1

L'étude de la biodiversité en classe de 2^{nde} a permis de montrer la grande variété des espèces animales et végétales et leur évolution au cours du temps. Cette situation permet de rappeler que les espèces sont classées les unes par rapport aux autres en fonction des caractères qu'elles vont partager.

► Exemple de réponse attendue

Les ptérosaures sont des dinosaures tout comme les dinosaures car ils possèdent un caractère en commun : la fenêtre antéorbitaire. Ils partagent donc un ancêtre commun.

Les ptérosaures ne sont pas des dinosaures car ils ne possèdent pas les membres placés verticalement sous le corps, caractère que possèdent par contre les oiseaux, d'où leur appartenance aux dinosaures.

Complément

Cet arbre représente un arbre phylogénétique traduisant les relations de parenté entre espèces actuelles et fossiles sur la base du partage de certains caractères. Le postulat de départ est simple : deux espèces partageant un même caractère sont apparentées car elles l'ont hérité d'une même espèce ancestrale.

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

Les méthodes d'établissement des liens de parenté entre espèces et la construction des arbres de parenté qui les représentent sont traitées dans l'activité 1 sur le cas des primates. Elles sont réexploitées dans l'activité 2 et, dans une moindre mesure, dans l'activité 3.

L'étude des caractères dérivés et ancestraux au sein de la lignée humaine permettra de mieux comprendre l'évolution de l'Homme et de retracer sa généalogie.

► SITUATION 2

La structure de l'ADN et sa variabilité ont été étudiées en 2^{nde}. La comparaison des séquences d'ADN a notamment permis d'identifier et de quantifier la variabilité allélique au sein d'une espèce ou entre deux espèces apparentées.

► Exemple de réponse attendue

La molécule d'ADN (acide désoxyribonucléique) est principalement constituée de 4 bases azotées (adénine, guanine, cytosine et thymine) qui s'apparient deux à deux : A avec T et G avec C. Elle est donc constituée de deux brins qui s'enroulent en une double hélice. Chaque ligne du document

représente la séquence de bases azotées d'un des deux brins.

Une mutation correspond à une modification de la séquence d'une molécule d'ADN.

• Si, dans la séquence, une base est remplacée par une autre c'est une mutation par **substitution**.

Exemple : la base 297 qui correspond à de l'adénine (A) dans l'allèle A du système de groupe sanguin ABO est remplacée par une guanine (G) dans l'allèle B.

Erratum : la position 297 a été rognée par erreur. Sera corrigée dans le manuel élève et numérique.

• Si, dans la séquence, une base disparaît c'est une mutation par **délétion**.

Exemple : pour l'allèle O, il y a disparition de la base 261 qui était de la guanine (G).

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

L'exploitation de matrices de comparaison des molécules d'ADN d'espèces actuelles et fossiles de primates permettra de préciser leur phylogénie (activités 1 et 3).

► SITUATION 3

La notion d'espèce a été abordée en classe de seconde car c'est un des outils permettant de décrire la biodiversité.

► Exemple de réponse attendue

Cette définition n'est pas toujours opérationnelle, par exemple, pour les espèces qui n'existent plus et que nous connaissons sous leur forme fossile (ammonites du document), ou pour les êtres vivants à reproduction asexuée comme les bactéries. Ainsi, pour la très grande majorité des fossiles, les seuls critères utilisables sont les critères de ressemblance (morphologie, anatomie).

Complément

Dans de rares cas, il est possible de recueillir et d'analyser de l'ADN de fossiles notamment chez certains représentants récents de la lignée humaine (dénisoviens et néanderthaliens).

► En classe de 1^{er} enseignement scientifique

Les espèces permettant de comprendre l'évolution de la lignée humaine sont, exceptée l'Homme, toutes éteintes. La rareté des fossiles et le fait que les squelettes découverts soient le plus souvent incomplets rendent délicate l'attribution de tels ou tels fossiles à une espèce connue ou à une nouvelle espèce comme le montre l'activité 2. Ainsi, l'établissement des liens de parenté est tout aussi délicat, tout comme l'établissement de filiations entre ces espèces, filiations qui ne peuvent qu'être hypothétiques.

Enfin, certaines découvertes récentes peuvent aussi remettre en question l'appartenance de divers fossiles à une même espèce ou à des espèces différentes comme c'est le cas pour les dénisoviens, les néanderthaliens et les sapiens (activité 3).

ACTIVITÉS

Dans ce chapitre, nous abordons la classification de l'Homme au sein des espèces actuelles (**activité 1**), puis des espèces fossiles (**activités 2 et 3**). Nous établissons sa phylogénie en utilisant notamment les innovations évolutives communes mais aussi la comparaison de séquences d'ADN.

La classification de l'Homme au sein des primates est abordée dans l'**activité 1** et permet de mettre en place les deux savoirs-faire suivants :

- 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.
- mettre en relation la ressemblance génétique entre les espèces de primates et leur degré de parenté.

L'**activité 2** aborde la notion de lignée humaine et les difficultés rencontrées par les paléoanthropologues pour classer l'ensemble des fossiles découverts depuis le début du XXI^e siècle.

L'histoire évolutive récente de l'Homme, avec notamment *Homo denisova* et *Homo néanderthalensis*, est présentée dans l'**activité 3**. Les caractéristiques du genre *Homo* y sont précisées.

p. 232 ■ **ACTIVITÉ 1**

L'Homme, un Primate parmi les Primates

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « L'espèce humaine actuelle (*Homo sapiens*) 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. C'est avec le chimpanzé qu'elle partage le plus récent ancêtre commun. »

Savoir-faire : « 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. Mettre en relation la ressemblance génétique entre les espèces de primates et leur degré de parenté. »

Les différents documents proposés permettent d'expliquer les principes de l'établissement d'une classification phylogénétique : comparaison de caractères anatomiques (*via* une matrice des caractères) pour lesquels des formes ancestrales et dérivées sont définies, détermination d'un ancêtre commun mais aussi comparaison de séquences de gènes, etc.

Pour information, la dernière classification datant de 2017 (G. Lecointre, H. Le Guyader, La classification phylogénétique du vivant) est la suivante (voir aussi la figure 2 p. 238) :

- les *Hominines* : genre *Homo* et *Australopithecus* + chimpanzés
- Homininés : *Hominines* et gorilles
- Hominidés : Homininés et orang-outan
- Hominoïdes : Hominidés et gibbon

Pour ce qui est de l'appellation « Grands singes » (terme non indiqué dans la classification phylogénétique), de nombreuses sources s'accordent à la considérer comme étant synonyme d'Hominoïdes.

Le **document 1** présente la méthode de classification phylogénétique des espèces les unes par rapport aux autres. Celles présentées sont actuelles et appartiennent toutes aux primates, excepté le Tupaïe qui en est toutefois assez proche et qui sert de référent non primate, permettant de définir les caractères ancestraux et par comparaison, les caractères dérivés spécifiques du groupe des primates. Le Tupaïe sert donc ici d'extragroupe.

Remarque :

Les auteurs ont fait le choix d'éviter les expressions du type « état dérivé ou ancestral d'un caractère » au profit de l'expression « caractère dérivé ou ancestral » par souci de simplification. De même, les termes « primitifs » et « évolués » sont évités afin d'éviter les connotations péjoratives qui pourraient être associées à cette terminologie par les élèves.

La présence de nouveaux caractères dits dérivés communs à deux espèces permettra de les apparenter et de définir un ancêtre commun porteur de ces caractères dérivés. Les caractères manquants dans la matrice (terminaison des doigts et vertèbres caudales) sont visibles sur les photographies des espèces proposées sur le document. La fig. 1 du cours (p. 238) illustre le caractère orbite fermée/ouverte peu intuitif pour les élèves.

Erratum : il manque une ligne pour l'orang-outan dans le tableau. Sera corrigé dans le manuel élève et numérique.

L'activité peut être construite à l'aide du logiciel *Phylogène* (cf. infra pour le lien) en utilisant la collection « Archontes » (primates), à la différence près que le logiciel présente le caractère « queue » dans des états ancestral « présente » et dérivé « absente ».

Le **document 2** aborde la technique de construction d'un arbre phylogénétique à partir des caractéristiques anatomiques et permet l'exploitation des données présentées dans le document 1. Une animation *Edumedia* présente également cette méthodologie à l'aide d'exemples différents plus simples. Cette animation peut aussi permettre de faire construire aux élèves l'arbre demandé, plus rapidement qu'avec *Phylogène* qui nécessite une prise en main plus longue. Il paraît en effet

important de revenir sur ces techniques qui n'ont pas été réellement revues depuis le cycle 4.

Le **document 3** montre que la comparaison de séquences d'ADN permet d'affiner l'arbre phylogénétique obtenu précédemment (qui n'est pas résolu) en permettant de classer les grands singes les uns par rapport aux autres. Si les documents proposés permettent de résoudre l'arbre, il sera aussi possible de proposer aux élèves une activité du même type basée sur les logiciels *Anagène* (ou *Géniegen*) ou *Phylogène* :

<https://anagene.reseau-canope.fr/>

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/logiciels/applications/geniegen/presentation-du-logiciel-geniegen>

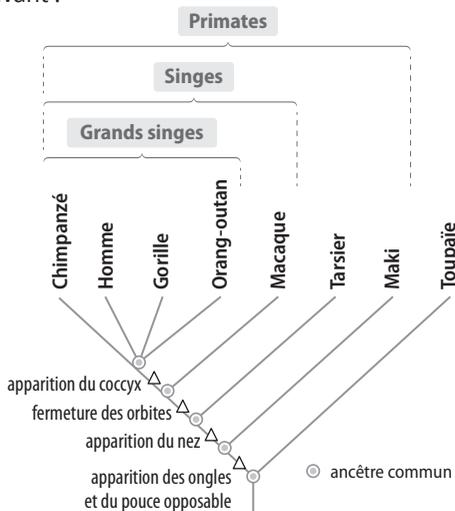
<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/logiciels/phylogene>

► Exemple de correction des pistes de travail

1. Le tableau complété est le suivant : Caractères ancestraux Caractères dérivés

	Terminaison des doigts (griffes ou ongles)	Pouce	Appendice nasal	Orbites	Vertèbres caudales (queue ou coccyx)
Homme	Ongles	Opposable	Nez	Fermées	Coccyx
Chimpanzé	Ongles	Opposable	Nez	Fermées	Coccyx
Gorille	Ongles	Opposable	Nez	Fermées	Coccyx
Orang-outan	Ongles	Opposable	Nez	Fermées	Coccyx
Macaque	Ongles	Opposable	Nez	Fermées	Queue
Tarsier	Ongles	Opposable	Nez	Ouvertes	Queue
Maki	Ongles	Opposable	Truffe	Ouvertes	Queue
Toupaie	Griffes	Non opposable	Truffe	Ouvertes	Queue

L'arbre phylogénétique correspondant est le suivant :

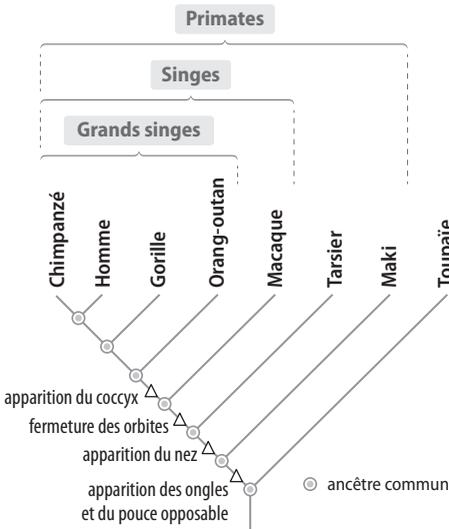


2. Ici, la seule étude des caractères morphologiques et anatomiques ne permet pas de classer les « Grands singes » (Homme, chimpanzé, gorille et orang-outan) les uns par rapport aux autres. En effet, on voit que ces 4 espèces sont toutes insérées sur le même ancêtre commun, on ne peut donc pas dire si l'Homme est plus apparenté à l'une des 3 autres espèces.

3. On observe que le l'Homme et le chimpanzé présentent le % de différence le plus faible pour le gène de la microcéphaline (1,03 %) dont on nous dit qu'il est représentatif d'une comparaison à l'échelle du génome. Le chimpanzé est donc l'espèce la plus proche de l'Homme.

Remarque : on trouvera à la page 238 du manuel des estimations récentes des % de différences génétiques entre l'Homme et les autres Grand singes.

On obtient au final l'arbre suivant :



p. 234 ■ **ACTIVITÉ 2**

L'histoire de la lignée humaine évoluée

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir : « Des arguments scientifiques issus de l'analyse comparée de fossiles permettent de reconstituer l'histoire de nos origines. L'étude de fossiles datés de 3 à 7 millions d'années montre des innovations caractéristiques de la lignée humaine (bipédie prolongée, forme de la mandibule). »

Savoir-faire : « Positionner quelques espèces fossiles dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères. »

Les différents documents permettent de construire une première phylogénie de la lignée humaine à partir d'une activité pratique et d'établir les critères d'appartenance à cette lignée.

Au travers de l'étude de deux fossiles controversés, ils montrent aussi la difficulté de construire un arbre satisfaisant pour l'ensemble de la communauté scientifique.

Le **document 1** pose les bases de l'appartenance à la lignée humaine au travers de l'exemple de Lucy.

Il est possible d'aller plus loin dans l'exploitation de Lucy qui est un bon exemple de remise en cause d'une théorie scientifique, ici l'« East side story », en réalisant l'exercice 7 page 243.

Le **document 2** permet une activité pratique basée sur le logiciel *Phylogène* (<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/logiciels/phylogene>) et répond à un des savoir-faire du programme officiel : « Positionner quelques espèces fossiles dans un arbre phylogénétique, à partir de l'étude de caractères ».

L'exploitation des photographies proposées permet de mieux visualiser les différences anatomiques observées.

Les élèves pourront s'appuyer sur la fiche technique du logiciel *Phylogène* proposée à la page 308.

Le **document 3** montre que la découverte de nouveaux fossiles appartenant à la lignée humaine ne permet pas forcément d'apporter des précisions sur l'histoire de l'évolution de l'Homme et que bien souvent, au contraire, elle la complique.

L'analyse portée par tel ou tel paléontologue n'étant pas la même, on arrive alors, en fonction des opinions, à des classifications différentes. On peut, par exemple, nourrir le débat que soulève ce document avec l'analyse portée par Kate Wong sur la découverte d'*A. sediba* :

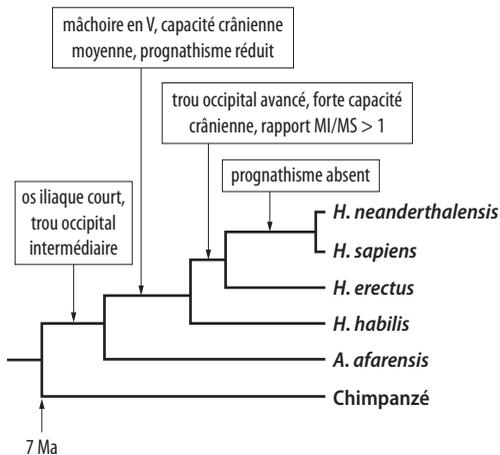
« *A. sediba* est plus ancien que les plus vieux fossiles du genre *Homo* correctement datés, tout en étant plus récent que *Australopithecus afarensis*, l'espèce de Lucy. Il pourrait donc être l'ancêtre immédiat de la lignée des *Homo*. Ses caractères évolués le positionneraient plus précisément en tant qu'ancêtre d'*Homo erectus*. Ainsi, au lieu du scénario dominant selon lequel *A. afarensis* aurait évolué en *Homo habilis*, qui aurait ensuite évolué en *Homo erectus*, ce serait plutôt *Australopithecus africanus* qui serait l'ancêtre d'*Australopithecus sediba*, lequel aurait ensuite évolué en *Homo erectus*. Si ce scénario est le bon, *Homo habilis* ne serait plus notre ancêtre, mais seulement un rameau de l'arbre phylogénétique du genre *Homo*. Les *Australopithecus afarensis* censés être à l'origine de tous les *Hominines* plus récents... seraient même mis de côté. »

Kate WONG (*Pour la science ; janvier-mars 2017*)

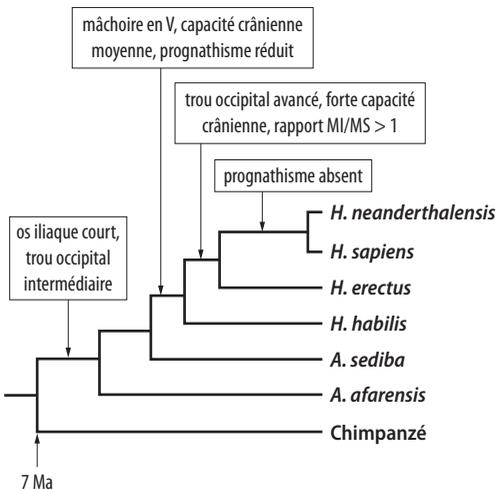
Exemple de correction des pistes de travail

1. D'après la matrice de caractère du document 2, les caractères dérivés communs à l'ensemble des représentants de la lignée humaine sont : l'os iliaque du bassin court et trou occipital en position intermédiaire ou avancé donc deux caractères liés à la bipédie.

2. L'arbre obtenu serait le suivant :



3. En ajoutant *A. sediba*, l'arbre devient :



Certains critères anatomiques placent *A. sediba* parmi les australopithèques (prognathisme, cerveau de petite taille) mais d'autres sont caractéristiques du genre *Homo* (front large, dents de petite taille, forme du bassin en coupe, forme du poignet). Ces caractéristiques, plus nombreuses, l'apparentent donc davantage au genre *Homo* que l'*afarensis*.

Remarque : l'âge de A. sediba pose cependant problème. Ainsi, de nombreux scientifiques doutent de sa place parmi les australopithèques et donc son positionnement dans l'arbre phylogénétique est difficile à réaliser (cf. texte de Kate Wong dans le commentaire du doc. 3) mais Yves Coppens dit : « Je ne pense pas que ce nouvel australopithèque soit un ancêtre direct de l'Homme comme l'annonce Lee Berger. Nous avons des traces de l'Homme qui remontent à près de 3 millions d'années, or la datation de cet australopithèque

sud-africain atteint à peine les 2 millions d'années. Je vois mal comment l'Homme pourrait avoir un ancêtre plus jeune que lui ! ».

4. *Homo naledi* présente une mosaïque de caractères pouvant le rapprocher de différentes espèces connues : *A. afarensis* (faible capacité crânienne, épaules, doigts, hanches), *H. habilis* (disposition des dents), *H. erectus* et autres *Homo* plus récents (forme du crâne, taille des dents, paume de la main, pied). Son positionnement dans l'arbre de la lignée humaine est donc difficile. De plus, son âge relativement récent (236 000 à 335 000 ans) traduit la persistance de caractéristiques que l'on pensait disparues chez les *Homo* (faible capacité crânienne, aptitude au mode de vie arboricole). Plus généralement, la découverte régulière de nouveaux fossiles permet de conforter ou de remettre en cause les hypothèses des chercheurs sur l'évolution humaine.

p. 236 ■ **ACTIVITÉ 3**

L'histoire récente du genre *Homo*

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Le genre *Homo* 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. Certains caractères sont transmis de manière non génétique : microbiote, comportements appris dont la langue, les habitudes alimentaires, l'utilisation d'outils... »

Savoir-faire : « Analyser des arguments scientifiques qui ont permis de préciser la parenté de *Homo sapiens* avec les autres *Homo*, et notamment la parenté éventuelle avec les Néandertaliens ou les Dénisoviens. »

L'objectif est ici de montrer l'ensemble des éléments scientifiques utilisés pour la reconstitution de l'histoire du genre *Homo* qui est d'emblée redéfinie.

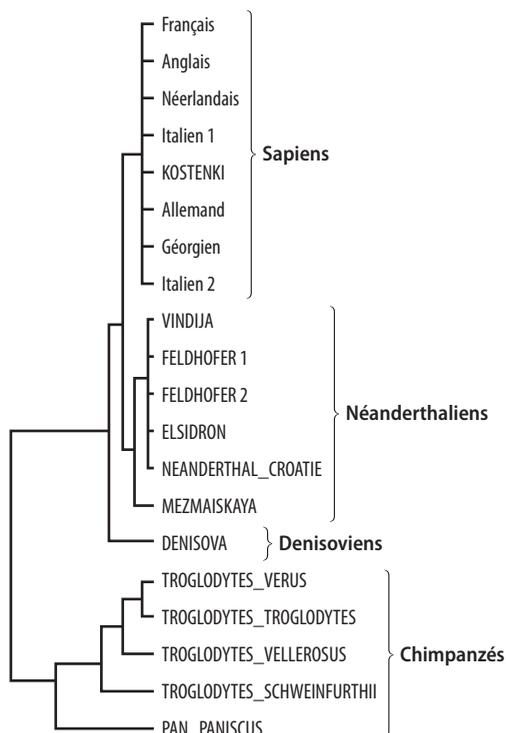
Le **document 1** présente ainsi les deux critères importants pour classer un fossile dans le genre *Homo* qui sont le crâne (avec une augmentation importante du volume cérébral, un aplatissement global de la face, un recentrage du trou occipital) et une bipédie permanente accompagnée d'une aptitude à la course.

*Remarque : si l'augmentation de la capacité crânienne est bien une caractéristique de l'évolution du genre *Homo*, on ne peut définir une valeur seuil qui définirait *Homo* (on connaît en effet des *Homo* à faibles capacités crâniennes comme *H. naledi* ou *H. floresiensis*).*

Le **document 2** explique que l'étude de l'ADN nucléaire a permis une classification précise de l'Homme et de ses ancêtres (doc. 2a) les plus proches en y intégrant notamment une espèce fossile découverte en 2008, *Homo denisovensis* qui a remis en cause l'histoire récente du genre *Homo*.

Les restes fossiles des dénisoviens sont minimes (une molaire et une phalange) donc inexploitable pour une classification anatomique mais, de l'ADN de la phalange a pu être extrait puis séquencé. Il a permis suite à la comparaison avec Sapiens et Néandertal d'établir la phylogénie proposée dans le document.

La construction de ce type d'arbre est possible avec *Phylogène* (<http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/evolution/logiciels/phylogene>) en utilisant par exemple ce type de matrice (Collections Hominiens, données moléculaires : Lignée humaine_ADNmt, Fichier : lignee humaine et Chimpanzé). En paramétrant la comparaison pour tenir compte des délétions, on obtient l'arbre suivant :



Ce résultat étant obtenu à partir d'une comparaison de l'ADN mitochondrial (séquence de 16 592 nucléotides), le résultat obtenu diffère cependant de l'arbre présenté par ce document et qui est basé sur une comparaison de l'intégralité des génomes. On voit notamment que les néanderthaliens sont plus proches des sapiens que des

denisoviens. C'est ici une bonne occasion d'exercer l'esprit critique des élèves.

Le **document 3** montre que de nombreux caractères, notamment anatomiques, sont transmis génétiquement et peuvent constituer des critères d'appartenance à une espèce dans le cas des espèces disparues. Certaines caractéristiques de représentants du genre *Homo*, tels que le langage chez Sapiens et Néandertal, l'art..., ne sont pas d'origine génétique et leur sont pourtant propres.

Remarque : les structures anatomiques impliquées dans l'acquisition du langage articulé sont bien évidemment codées génétiquement, ce qui n'est pas le cas pour l'expression orale proprement dite.

Ici, l'étude du microbiote a permis de montrer simplement qu'il y a bien eu un lien proche (partage de nourriture, baisers...) ayant permis la transmission de bactéries buccales entre *H. neandertalensis* et *H. sapiens*, preuve de leur probable cohabitation.

Enfin, le **document 4** illustre par une carte synthétique les différents mouvements migratoires de divers représentants du genre *Homo*. On voit notamment :

- que les liens de filiations entre ces différentes espèces ne sont qu'hypothétiques.
- les aires supposées de la répartition des dénisoviens et des néandertaliens en contact l'une avec l'autre.
- le fait que la plupart des espèces disparaissent peu après l'arrivée d'*Homo sapiens*.
- la possibilité de métissage entre les espèces *sapiens*, *denisova* et *neanderthalensis* qui ne formeraient donc qu'une seule espèce (absence de barrières reproductives).

Exemple de correction des pistes de travail

1. L'*Australopithecus africanus* n'appartient pas au genre *Homo* car :

- son volume cérébral est trop faible (450 cm³) par rapport aux membres du genre *Homo* (1 100 cm³ pour *Homo erectus*).
- il possède un fort prognathisme.
- il est bipède permanent mais n'a pas d'aptitude à la course, critères importants de l'appartenance au genre *Homo*.

2. L'analyse génétique des différents génomes humains montre assez de différences pour distinguer 3 espèces récentes et distinctes d'*Homo* : sapiens, néanderthaliens et dénisoviens.

En effet, leur ancêtre commun semble suffisamment éloignés : environ 1 millions d'années pour le groupe néanderthaliens – dénisoviens et sapiens et 600 000 ans entre dénisoviens et néanderthaliens.

De plus, dans l'hypothèse où néanderthaliens et dénisoviens seraient en réalité des sapiens, l'arbre de parenté obtenu n'aurait pas regroupé tous les *Homo sapiens* actuels sur un même ancêtre commun exclusif.

3. Il a existé une proximité sociale certaine entre sapiens et néanderthaliens puisque l'analyse de leur plaque dentaire montre la présence de bactéries identiques dont la présence ne peut s'expliquer que par l'échange de nourriture ou de baisers (doc. 3). De plus, l'analyse de leurs génomes respectifs montre que « La présence de séquences ADN néandertaliennes et dénisoviennes au sein des génomes des populations humaines actuelles suggère la possibilité de mélanges entre ces différents groupes d'*Homo*. » (doc. 4).

Ces arguments remettent en cause l'existence de trois espèces récentes d'*Homo*, puisque s'il y a eu mélanges donc interfécondité, partage d'une vie commune, il se peut qu'il puisse s'agir d'une seule et même espèce d'*Homo*.

4. Les deux hypothèses expliquant la disparition des néandertaliens et dénisoviens suggérées par le document 4 sont :

- une disparition suite à des conflits avec sapiens (conflits pour les ressources alimentaires et des territoires).
- une assimilation au sein des populations de sapiens, peut-être plus nombreuses, au grès des mélanges.

Remarque : d'autres hypothèses peuvent être faites comme :

- la famine : la disparition du gros gibier type mammoth en serait la principale cause,
- des épidémies,
- des conséquences de changements climatiques,
- un appauvrissement de la diversité génétique au sein de groupes de faibles effectifs (voir chapitre 1)

La cause de leur disparition n'est probablement pas unique mais multifactorielle.

CORRECTION DES EXERCICES

p. 241 ■

Vérifier ses connaissances

1 Question à réponse unique

A- 4

La réponse 1 est fautive car il existe de nombreuses espèces fossiles présentant plus de caractères dérivés communs avec l'Homme que le chimpanzé, notamment ceux en relation avec la bipédie.

La réponse 2 est fautive car le chimpanzé n'est qu'un bipède occasionnel (5 % du temps).

La réponse 3 est fautive car, d'une part, le chimpanzé n'a pas de queue et que, d'autre part, la queue n'est pas le caractère dérivé spécifique des primates, autrement dit il existe des primates sans queue mais avec un coccyx (comme l'Homme).

La réponse 4 est juste car le chimpanzé comme l'Homme possède les caractères dérivés caractéristiques des primates (pouces opposables, ongles).

B- 2

La réponse 1 est fautive car comparer des caractères anatomiques ne permet pas d'établir une comparaison au niveau génétique.

La réponse 3 est fautive car on compare plusieurs espèces entre elles et non différents individus d'une même espèce.

La réponse 4 est fautive car, en phylogénie, les espèces partagent des ancêtres hypothétiques. On détermine donc quelle espèce est la plus apparentée à telle autre espèce sans établir de liens de filiations entre elles (d'autant plus s'il s'agit d'espèces actuelles).

C- 1

La réponse 2 est fautive car le genre *Homo* est doté d'une mâchoire parabolique (en forme de V et non de U).

La réponse 3 est fautive car l'absence de queue est un caractère dérivé spécifique des grands singes et que les ongles et griffes correspondent aux caractères dérivés spécifiques du groupe des primates. Ils ne sont donc pas exclusifs au groupe des *Homo*.

La réponse 4 est fautive car les représentants du genre *Homo* n'ont pas tous une face prolongée vers l'avant.

D- 2

La réponse 1 est fautive car on connaît de nombreux fossiles de la lignée humaine bien plus anciens que les néanderthaliens (comme *Australopithecus afarensis*).

La réponse 3 est fautive car s'il est vrai que des études ont pu être menées sur leur ADN, ils sont surtout connus par les squelettes retrouvés ainsi que par les traces culturelles qu'ils ont laissés (outils, etc.).

La réponse 4 est fautive car il s'agissait d'excellents bipèdes.

La réponse 2 est juste car ils ont vécu à la même période et ont partagé en partie un même territoire entre Europe et Asie.

2 Avoir un regard critique

a. Le gorille est un primate car il possède des ongles et un pouce opposable. D'une part, la présence d'une queue (qui est un caractère ancestral) n'est pas le caractère dérivé spécifique du groupe des primates et, d'autre part, le gorille n'en possède pas.

b. Le séquençage de l'ADN d'*Homo denisoviensis* a permis de montrer qu'il avait cohabité avec *Homo neandertalensis* (et *Homo sapiens*). En effet, on ne dispose pas de squelette des dénisoviens mais uniquement de molaires et d'une phalange sur lesquelles des analyses ADN ont pu être menées. Des séquences spécifiques des dénisoviens ayant été retrouvées au sein des génomes de sapiens ou de néanderthaliens, on en déduit que des hybridations ont pu avoir lieu donc qu'il y a eu cohabitation. Ce que suggèrent la datation des 3 formes qui ont vécu en partie à la même époque et le site de découverte des fossiles de *denisova* qui est compris dans les territoires fréquentés par sapiens et néanderthaliens.

c. Les grands singes comprennent exclusivement le chimpanzé, le gorille, l'orang-outan, le gibbon et l'Homme car ils ne possèdent pas de queue mais un coccyx. Les ongles sont le caractère dérivé spécifique d'un groupe plus grand : les primates.

d. Le microbiote, la fabrication d'outils et l'art sont trois exemples de caractéristiques non transmises génétiquement qui permettent de construire l'histoire des primates. Le microbiote représente l'ensemble des micro-organismes vivant en symbiose avec chaque individu. Sa transmission est assurée par l'allaitement puis par des régimes alimentaires communs. La fabrication d'outils et l'art sont quant à eux des attributs culturels transmis par apprentissage.

3 Retours sur les problématiques

• Comment établir des liens de parenté entre *Homo sapiens* et les autres espèces animales ?

Il est possible d'établir des liens de parenté entre *Homo sapiens* et les autres espèces en comparant leurs caractères morphologiques, anatomiques ou même comportementaux. Pour chaque caractère, on détermine s'il s'agit d'une forme ancestrale ou dérivée.

Plus deux espèces partagent un grand nombre de caractères dérivés et plus elles sont apparentées. Autrement dit, plus elles partagent un ancêtre commun récent. On peut aussi comparer leur ADN et établir des pourcentages de

ressemblances pour un ou plusieurs gènes donnés. Aujourd'hui, il devient possible de comparer l'intégralité des génomes de différentes espèces. Plus le pourcentage de différence sera faible et plus les espèces seront apparentées.

• Quelle est l'espèce animale la plus apparentée à l'espèce humaine ?

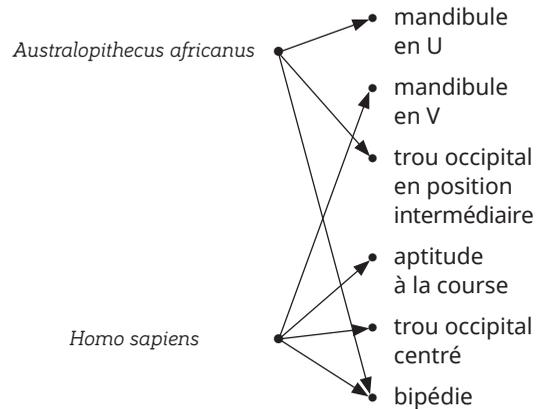
Sur la base des critères précédents et notamment par comparaison de leur ADN, on peut dire que l'espèce actuelle la plus proche de l'Homme est le chimpanzé (98,79 % d'ADN commun).

• Que savons-nous de l'histoire évolutive de notre espèce ?

Parmi les caractéristiques définissant les membres du groupe des *Homo*, on peut citer l'acquisition d'une forte capacité crânienne ainsi qu'une bipédie permanente se traduisant par une aptitude à la course.

Originaires d'Afrique, les espèces du groupe *Homo* ont pu coloniser, de générations en générations, le reste du monde à commencer par le Moyen-Orient, l'Europe et l'Asie. De nombreuses études montrent que dans ces régions, différentes espèces d'Hommes (sapiens, dénisoviens, néanderthaliens) cohabitèrent.

4 Mettre en relation ses connaissances



p. 243 ■

Exercice similaire

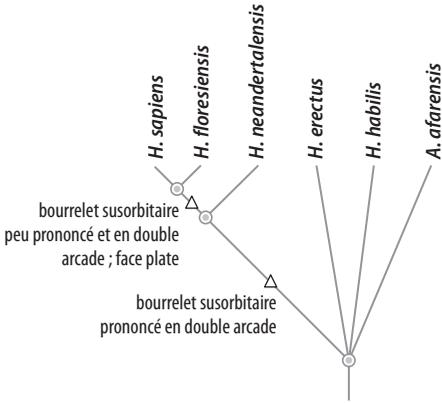
6 Construire un arbre

1. L'Homme de Florès est un excellent support pour faire réfléchir sur le fait que la place d'un taxon sur un arbre dépend des caractères retenus. Il présente une combinaison de caractères ancestraux et dérivés de façon à ce que, suivant

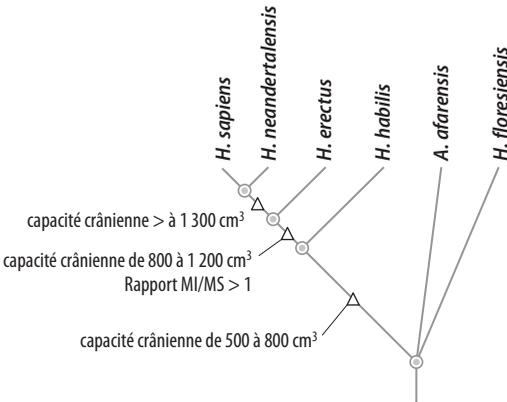
le caractère dérivé choisi, le lien de parenté établi varie.

Par exemple, les caractères dérivés face plate et bourrelets susorbitaires peu prononcés et en double arcade qu'il partage avec *Homo sapiens* entre en contradiction avec une capacité crânienne importante et un rapport MI/MS supérieur à 1, apparus chez un ancêtre commun ancien mais qu'*Homo floresiensis* ne possède pas.

Selon les caractères dérivés retenus, on obtient les arbres suivants :



Arbre obtenu sur la base des caractères face et bourrelet susorbitaire.



Arbre obtenu sur la base des caractères capacité crânienne et rapport MI/MS.

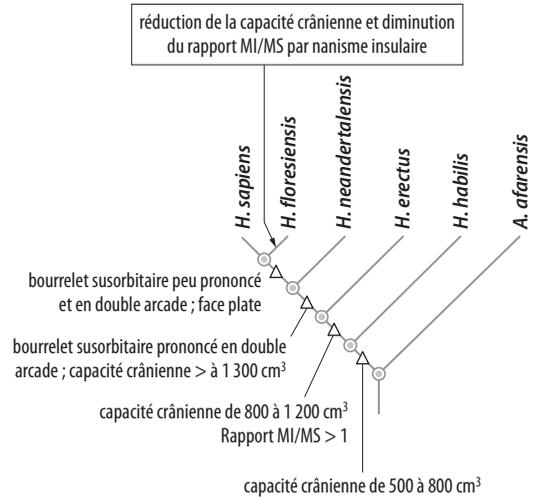
Remarque : dans les deux cas, plus de trois branches sont reliées à un même ancêtre commun, ce qui signifie qu'un lien de parenté n'a pas pu être clairement établi entre ces espèces.

2. On peut considérer qu'*Homo floresiensis* a subi une évolution similaire à celles des animaux insulaires actuels vers le nanisme et que sa faible capacité crânienne et son rapport MI/MS sont des évolutions secondaires liées à ce nanisme. Il s'agit

en quelque sorte de nouveaux caractères dérivés qui lui sont spécifiques mais proches des caractères ancestraux des autres espèces.

Remarque : cet arbre ne présente qu'une des hypothèses possibles parmi les nombreuses hypothèses encore discutées par les scientifiques. C'est celle que les élèves peuvent émettre d'après les données de l'exercice.

On peut donc établir l'arbre suivant :



Arbre de parenté final.

S'entraîner

7 Remettre en cause une théorie

La théorie de « L'East side story » spécifie que la lignée humaine est née dans la savane. Lucy qui est un *Australopithecus afarensis* était considérée à l'époque comme le premier représentant de la lignée humaine. Étant bipède, elle possédait l'avantage de voir ses prédateurs ou ses proies au-dessus des grandes herbes, ce qui n'était pas possible pour les singes de l'époque qui évoluaient à quatre pattes. Cela lui donnait donc un avantage sélectif dans la savane.

La découverte d'Orrorin en 2000 remis en cause cette théorie. Les caractéristiques de ce fossile le place dans la lignée humaine, il est bipède et vivait en milieu boisé, et étant daté de 6 millions d'années, il est beaucoup plus âgé que Lucy. La théorie stipulant que la bipédie est liée à une sélection naturelle de cette aptitude dans la savane n'est donc plus valable.

8 Tirer des renseignements d'un arbre

1. b.

La réponse a. est fausse car dans ce cas, Chinois et Géorgiens seraient côte à côte.

La réponse c. est fausse car cela est aussi vrai pour les autres populations.

La réponse d. est fausse car si c'était le cas, les deux populations seraient sur une même branche.

2. b.

3. a.

On observe en effet que les populations africaines partagent les ancêtres communs les plus anciens ce qui signifie que ces populations ancestrales étaient africaines.

4. c.

Les réponses a. et b. sont fausses car on ne peut considérer une population actuelle comme ancêtre des autres populations.

La réponse d. est fausse car il existe bien un lien de parenté entre toutes ces populations.

9 Classer un fossile

L'angle mesuré pour Toumaï est de 93° , très proche de l'Homme (94°) et supérieur aux 80° de l'australopithèque dont la bipédie est prouvée. La tête de Toumaï semble donc se positionner au-dessus de sa colonne tout comme chez l'Homme et non vers l'avant. Cette caractéristique permet donc de dire qu'il était bipède, ce qui est un critère d'appartenance à la lignée humaine et ce malgré son petit volume crânien proche de celui du chimpanzé. L'angle du chimpanzé de 30° montre que sa tête est penchée vers l'avant. Un autre critère d'appartenance serait le relatif aplatissement de la face visible sur la radiographie, supérieur à celui de l'australopithèque (mesure de l'angle facial).

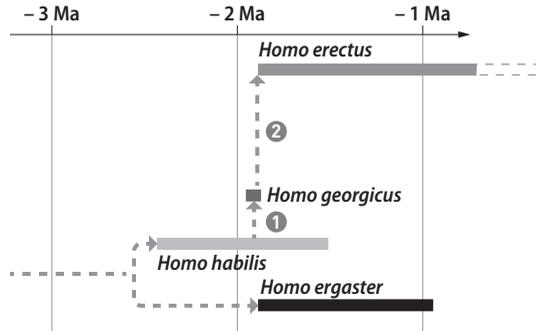
10 Prépa BAC Envisager des théories différentes

1. On peut citer les critères suivants :

- une capacité crânienne élevée (700 à 800 cm³).
- des membres inférieurs adaptés à la marche et à la course.

- la capacité à produire des outils par la taille de silex.

2. On peut proposer le schéma suivant :



Homo georgicus est daté de 1,8 Ma. Il serait le descendant d'*Homo habilis* (flèche ①) et l'ancêtre d'*Homo erectus* (flèche ②). En conséquence, *Homo ergaster* ne serait plus l'ancêtre d'*Homo erectus*.

3. *Homo georgicus* serait le descendant d'*Homo habilis* dont tous les fossiles ont été découverts en Afrique. Descendant d'*Homo habilis* qui n'a pas quitté l'Afrique et ayant été trouvé en Europe, *H. georgicus* serait donc bien le premier *Homo* européen, avant *H. erectus*.

4.

• **Argument théorie 1 :** le mélange des caractères d'*Homo erectus* (face allongée) et d'*Homo habilis* (faible capacité crânienne) du crâne 5 est dû à leur variabilité au sein d'une même espèce.

Par exemple, la différence de capacité crânienne maximale entre *habilis* et *erectus* est de : $1\ 200 - 550 = 650\text{ cm}^3$. Or, on se rend compte que chez l'Homme, cette variabilité est du même ordre de grandeur alors que les mesures sont réalisées au sein d'une seule espèce : $1\ 700 - 1\ 100 = 600\text{ cm}^3$.

• **Argument théorie 2 :** il y a trop de différences importantes entre *georgicus* et les autres *Homo* pour que celles observées sur le crâne 5 soient attribuées à la seule variabilité : différence sur le volume crânien mais aussi l'allongement de la face, la forme de la mandibule et d'autres différences. C'est donc une nouvelle espèce.

Les modèles démographiques

LE PROGRAMME

3. Une histoire du vivant

3.4. – Les modèles démographiques

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.</p> <p>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 $u(n)$.</p> <p>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>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.</p> <p>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>

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.

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.

Des modèles plus élaborés prévoient que la population mondiale atteindra environ 10 milliards d'humains en 2050.

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.

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.

Prérequis et limites

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.

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ

■ p. 246

SITUATION 1

Cette première situation permet de remobiliser des notions vues au Collège et en classe de Seconde sur les fonctions affines, la résolution d'équations du premier degré, ainsi que la lecture d'un graphique.

Exemple de réponse attendue

La fonction f est une fonction affine, donc son expression est de la forme $f(t) = at + b$.

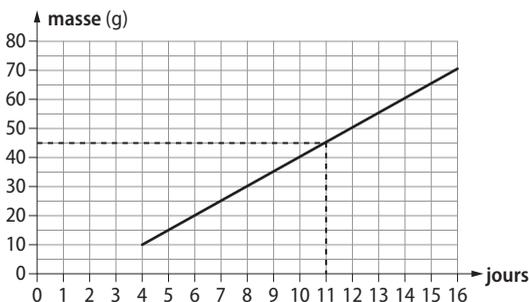
Quatre jours après l'éclosion, la masse est de 10 grammes, donc $f(4) = 10$, soit $4a + b = 10$.

Sept jours après, elle est de 25 grammes, donc $f(7) = 25$, soit $7a + b = 25$.

On en déduit que $3a = 15$, et par suite, $a = 5$.

Et $4 \times 5 + b = 10$, donc $b = 10 - 20 = -10$.

Par conséquent, $f(t) = 5t - 10$.



L'oisillon pèsera plus de 45 grammes au bout de 11 jours.

En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique, on utilisera ces notions dans le cadre de l'étude du modèle linéaire.

SITUATION 2

Cette situation permet de revenir sur la notion de fonction, et particulièrement sur la recherche d'un maximum en utilisant la représentation graphique d'une fonction. Elle utilise des notions vues en classe de Seconde.

Exemple de réponse attendue

Pour obtenir la recette maximale, le producteur doit vendre sa récolte 12 jours après le 15 juin, c'est-à-dire le 27 juin.

En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique l'élève va découvrir des suites, c'est-à-dire des fonctions d'une variable entière. Il va aussi utiliser la représentation graphique de ces fonctions pour prévoir l'évolution de certaines populations.

SITUATION 3

Cette situation réactive les connaissances vues en classe de Seconde sur les pourcentages d'évolution d'une quantité.

► Exemple de réponse attendue

Entre 2015 et 2016, le pourcentage d'augmentation est égal à : $\frac{1,5-1,3}{1,3} \approx 0,15$, soit environ 15 %.

Entre 2016 et 2017, le pourcentage d'augmentation est égal à : $\frac{1,7-1,5}{1,5} \approx 0,13$, soit environ 13 %.

D'après l'énoncé, entre 2017 et 2018, le pourcentage d'augmentation est d'environ 17 %.

Le pourcentage d'augmentation a été le plus grand entre 2017 et 2018.

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique, l'élève va être amené à calculer et à interpréter des pourcentages d'évolution, particulièrement dans l'étude du modèle exponentiel.

ACTIVITÉS

Dans ce chapitre, on s'intéresse aux modèles démographiques, et particulièrement aux deux plus simples, le modèle linéaire et le modèle exponentiel. Les différentes activités donnent de nombreux exemples sur des populations variées pour lesquelles ces deux modèles sont valides pendant une période donnée.

L'activité 1 présente sur des exemples les outils qui vont être utilisés dans ce chapitre : la variation absolue, le taux de variation et l'ajustement graphique d'un nuage de points.

L'activité 2 est consacrée à la découverte du modèle linéaire et des suites arithmétiques.

L'activité 3 introduit le modèle exponentiel par le biais des suites géométriques.

L'activité 4 permet de travailler sur le modèle démographique de Malthus.

p. 248 ■ **ACTIVITÉ 1**

Des outils pour comprendre des évolutions

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoir-faire : « Produire et interpréter des graphiques statistiques traduisant l'effectif d'une population ou de ressources, notamment sous forme de nuages de points.

À l'aide d'une calculatrice ou d'un tableur, ajuster un nuage de points par une droite.

À partir de données démographiques, calculer le taux de variation d'une population entre deux dates. »

Le **document 1** présente Thomas Malthus et pose le problème traité dans ce chapitre, c'est-à-dire celui de l'évolution des populations et celui des ressources disponibles.

Le **document 2** présente des données démographiques sur la population de Paris de 2006 à 2011 sous forme d'un nuage de points. Ceci permet d'introduire une fonction de la variable entière et deux notions indispensables pour ce chapitre : la variation absolue et le taux de variation.

Le **document 3** présente l'évolution de la population du Qatar entre 1995 et 2018 à l'aide d'un nuage de points.

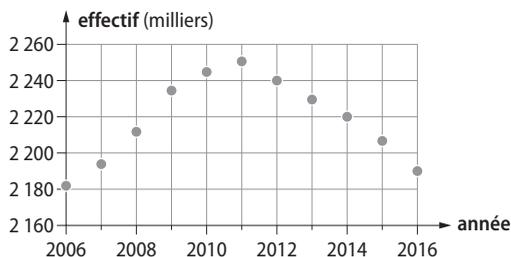
Le **document 4** s'intéresse à l'évolution d'une ressource, le riz, en parallèle avec l'évolution de la population mondiale.

Le **document 5** fournit des données numériques relatives à la population de la Turquie et demande de les représenter graphiquement. C'est l'occasion d'introduire la notion d'ajustement d'un nuage de points par une droite.

DOC 2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

On complète le nuage de points. On remarque que la population décroît après 2011.



DOC 3 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

On calcule les taux de variation d'un palier à l'autre dans le tableau ci-dessous.

	A	B	C	D
1	Année	Population	Variation absolue	Taux de variation
2	1995	513		
3	1996	522	9,0	1,8%
4	1997	535	13,0	2,5%
5	1998	552	17,0	3,2%
6	1999	570	18,0	3,3%
7	2000	592	22,0	3,9%
8	2001	615	23,0	3,9%
9	2002	641	26,0	4,2%
10	2003	682	41,0	6,4%
11	2004	754	72,0	10,6%
12	2005	865	111,0	14,7%
13	2006	1022	157,0	18,2%
14	2007	1218	196,0	19,2%
15	2008	1437	219,0	18,0%
16	2009	1655	218,0	15,2%
17	2010	1856	201,0	12,1%
18	2011	2035	179,0	9,6%
19	2012	2196	161,0	7,9%
20	2013	2337	141,0	6,4%
21	2014	2459	122,0	5,2%
22	2015	2566	107,0	4,4%
23	2016	2654	88,0	3,4%
24	2017	2725	71,0	2,7%
25	2018	2782	57,0	2,1%

DOC
4 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• On calcule les taux de variation de la population mondiale et de la production de riz entre 2013 et 2016 dans le tableau ci-dessous.

Année	Riz	Population	Taux de variation de la production de riz	Taux de variation de la population mondiale
2012	737	709		
2013	743	717	0,8%	1,1%
2014	743	726	0,0%	1,3%
2015	746	734	0,5%	1,1%
2016	752	743	0,8%	1,2%

• On constate que, sur cette période, le taux de variation de la production de riz a toujours été inférieur au taux de variation de la population mondiale. Ceci explique le commentaire fait par la FAO sur la régression de la production de riz par tête d'habitant.

DOC
5 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• On choisit les deux points extrêmes du nuage de points : A (0 ; 72,3) et B (8 ; 82,3).

On détermine alors une équation de la droite (AB).

Une équation de (AB) est : $y = ax + b$, avec a et b , deux nombres à déterminer.

Puisque A appartient à (AB) : $72,3 = a \times 0 + b = b$.
D'où $b = 72,3$.

Puisque B appartient à (AB) :

$82,3 = a \times 8 + b = 8a + 72,3$. D'où $8a = 10$ et $a = 1,25$.

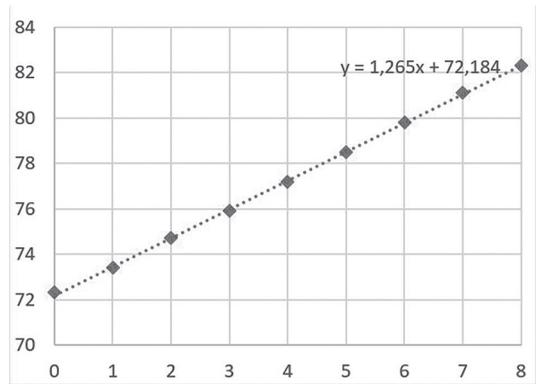
Une équation de la droite (AB) est :

$$y = 1,25x + 72,3.$$

• On fait afficher l'équation avec le tableur :

$$y = 1,265x + 72,184.$$

Cette équation est très proche de celle obtenue en utilisant les points extrêmes de la droite.



► Exemple de correction des pistes de travail

1. Les populations sont étudiées tous les ans, ou tous les mois, ou toutes les heures, donc la variable est toujours entière dans ces problèmes d'évolution de populations : la fonction utilisée est une fonction de la variable entière, appelée aussi une suite.

2. La variation absolue d'une grandeur u d'un palier n au suivant $n + 1$ est la différence $u(n + 1) - u(n)$, alors que le taux de variation d'une grandeur u d'un palier n au suivant $n + 1$ est le quotient de la variation absolue par la valeur de la grandeur au palier n .

Le taux de variation peut s'exprimer en pourcentage.

3. Ajuster un nuage de points, c'est déterminer une droite qui passe au plus près des points du nuage. Cet ajustement permet de réaliser des prévisions avec l'hypothèse qu'il reste valable pour des valeurs de n supérieures aux valeurs utilisées pour le graphique.

Le modèle linéaire

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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.

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). »

Savoir-faire : « Exprimer $u(n)$ en fonction de $u(0)$ et n .

Utiliser ce modèle linéaire pour faire des prévisions. »

Le **document 1** donne un exemple de modèle linéaire pour la population d'une ville. On constate que la variation absolue est constante et que les points du graphique semblent alignés.

Le **document 2** formalise sur l'exemple du document 1 le modèle utilisé en mettant en évidence une suite arithmétique, puis en détaillant le calcul du terme général d'une suite arithmétique.

Le **document 3** présente l'évolution de la population du Mexique entre 2011 et 2018 à l'aide d'un nuage de points et sa modélisation par une suite arithmétique. On réalise un ajustement du nuage par une droite.

Le **document 4** s'intéresse à une population d'ours, et l'hypothèse du modèle linéaire permet de réaliser des prévisions sur l'effectif de cette population, à l'aide d'un ajustement du nuage de points.

1 Pour mener une investigation

Exemple de correction

• Les deux premiers points du nuage sont $A(0 ; 10\,000)$ et $B(1 ; 10\,500)$.

Une équation de la droite (AB) est $y = ax + b$, avec a et b , deux nombres à déterminer.

A appartient à (AB) , donc $10\,000 = a \times 0 + b$, d'où $b = 10\,000$.

B appartient à (AB) , donc $10\,500 = a \times 1 + 10\,000$, d'où $a = 500$.

Une équation de la droite d est bien :
 $y = 500x + 10\,000$.

• Le point de coordonnées $(2 ; 11\,000)$ appartient à d car $11\,000 = 500 \times 2 + 10\,000$.

Le point de coordonnées $(3 ; 11\,500)$ appartient à d car $11\,500 = 500 \times 3 + 10\,000$.

Le point de coordonnées $(4 ; 12\,000)$ appartient à d car $12\,000 = 500 \times 4 + 10\,000$.

Le point de coordonnées $(5 ; 12\,500)$ appartient à d car $12\,500 = 500 \times 5 + 10\,000$.

Le point de coordonnées $(6 ; 13\,000)$ appartient à d car $13\,000 = 500 \times 6 + 10\,000$.

Le point de coordonnées $(7 ; 13\,500)$ appartient à d car $13\,500 = 500 \times 7 + 10\,000$.



4 Pour mener une investigation

Exemple de correction

• La droite d'ajustement du nuage de points a pour équation : $y = 3,6071x + 22,5$.

L'année 2040 est l'année de rang 28, puisque $2040 = 2012 + 28$.

Pour $x = 28$, $y = 3,6071 \times 28 + 22,5 = 123,4988$.

On peut estimer à 123 le nombre d'ours en 2040 selon ce modèle.

• Ce modèle semble valide sur quelques années, mais rien ne dit qu'il le sera encore en 2040. Rien ne permet de l'affirmer.

Exemple de correction des pistes de travail

1. Variations absolues de la population du Mexique entre deux années consécutives de 2011 à 2018.

Année	2011	2012	2013	2014
Rang n	0	1	2	3
Population (en millions d'habitants)	115,7	117,3	118,8	120,4
Variation absolue		1,6	1,5	1,6

Année	2015	2016	2017	2018
Rang n	4	5	6	7
Population (en millions d'habitants)	121,9	123,3	124,8	126,2
Variation absolue	1,5	1,4	1,5	1,4

2. Les variations absolues sont presque constantes, voisines de 1,5.

On peut donc modéliser cette évolution par une suite arithmétique u de raison 1,5 et de premier terme $u(0) = 115,7$. On a donc, pour tout entier naturel n : $u(n) = 115,7 + 1,5n$.

p. 252 ■ **ACTIVITÉ 3**

Le modèle exponentiel

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « Une grandeur discrète u varie de manière exponentielle en fonction du palier entier n si sa variation absolue est proportionnelle à sa valeur courante. Dans ce cas, sa variation relative (ou taux de variation) est constante.

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. »

Savoir-faire : « À partir de données démographiques, calculer le taux de variation d'une population entre deux dates.

Exprimer $u(n)$ en fonction de $u(0)$ et n .

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. »

Le **document 1** donne un exemple de croissance exponentielle à partir de l'étude de la population du Honduras entre 1975 et 1983. On constate que la variation absolue d'une année à la suivante augmente et que le taux de variation est presque constant.

Le **document 2** formalise sur un exemple le modèle exponentiel. L'objectif est d'obtenir l'expression du terme général d'une suite géométrique en fonction de son premier terme et de sa raison.

Le **document 3** aborde la modélisation d'une évolution par une suite géométrique. Dans le cas de l'Angola, on peut choisir la raison de la suite en observant les taux de variation de la population d'une année à l'autre. Dans le cas de Madagascar, il s'agit de calculer la raison à partir de deux données : celle de la population en 1970 et celle de la population en 2015.

Le **document 4** s'intéresse au temps de doublement d'une population dans le cas d'une croissance exponentielle.

DOC 2 Pour mener une investigation

Exemple de correction

• $u(1) = 1,16 \times u(0) = 1,16 \times 8\,000 = 9\,280$

$u(2) = 1,16 \times u(1) = 1,16 \times 9\,280 = 10\,764,8$

$u(3) = 1,16 \times u(2) = 1,16 \times 10\,764,8 = 12\,487,168$

• $u(1) = 1,16 \times u(0)$.

$u(2) = 1,16 \times u(1) = 1,16 \times 1,16 \times u(0) = 1,16^2 \times u(0)$

$u(3) = 1,16 \times u(2) = 1,16 \times 1,16^2 \times u(0) = 1,16^3 \times u(0)$

$u(4) = 1,16 \times u(3) = 1,16 \times 1,16^3 \times u(0) = 1,16^4 \times u(0)$

$u(5) = 1,16 \times u(4) = 1,16 \times 1,16^4 \times u(0) = 1,16^5 \times u(0)$

$u(5)$ représente la population de la ville en 2020.

• $u(n)$ est la population en 2015 + n et 2030 = 2015 + 15 donc la population en 2030 est $u(15)$.

• On a multiplié 15 fois de suite $u(0)$ par 1,16. Donc $u(15) = 1,16^{15} \times u(0)$.

Comme $u(0) = 8\,000$, on a : $u(15) = 1,16^{15} \times 8\,000$, soit $u(15) \approx 74\,124$.

On peut prévoir qu'en 2030, la population sera de 74 124 habitants.

DOC 4 Pour mener une investigation

Exemple de correction

• Pour une augmentation de 10 % par an et une population initiale de 100 millions, le temps de doublement est de 8 ans.

En donnant différentes valeurs à la population initiale, on observe que ce temps reste égal à 8 ans.

Par exemple, pour une population initiale de 150 millions :

	A	B
1	n	Population (en millions)
2	0	150
3	1	165
4	2	182
5	3	200
6	4	220
7	5	242
8	6	266
9	7	292
10	8	322
11	9	354
12	10	389

Le temps de doublement ne semble pas dépendre de la population initiale.

- Lorsque l'augmentation est de 2 % par an, le temps de doublement est de 35 ans.
- On modifie le taux d'évolution (entre 2 % et 10 %) jusqu'à trouver la réponse.

La population double au bout de 25 ans lorsque l'augmentation est de 2,9 % par an.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. On peut modéliser la population du Honduras depuis 1975 par la suite géométrique de premier terme $u(0) = 3\,153\,253$ et de raison $q = 1,031$.

Ainsi, $u(n) = u(0) \times 1,031^n$.

On calcule $u(43)$ car $2\,018 = 1\,975 + 43$.

$$u(43) = 3\,153\,253 \times 1,031^{43}$$

$$u(43) \approx 11\,718\,754.$$

Or la population du Honduras était de 9 587 522 habitants en 2018.

Le modèle n'est pas resté valable jusqu'en 2018.

2. • Pour l'Angola, $u(n) = 18,76 \times 1,037^n$.

On calcule $u(26)$ car $2\,030 = 2\,004 + 26$.

$$u(26) = 18,76 \times 1,037^{26}$$

$$u(26) \approx 48,25.$$

Selon ce modèle, la population en 2030 sera d'environ 48 millions d'habitants.

On peut utiliser un tableur ou une calculatrice pour déterminer le temps de doublement de la population.

Avec un tableur, on peut utiliser le fichier logiciel du document 4.

Avec une calculatrice, on saisit $y = 1,037^x$ et on cherche dans la table de valeurs la plus petite valeur de x telle que $1,037^x \geq 2$.

Le temps de doublement de la population est de 20 ans.

• Pour Madagascar, $u(n) = 6\,576\,305 \times 1,0294^n$.

On calcule $u(60)$ car $2\,030 = 1\,970 + 60$.

$$u(60) = 6\,576\,305 \times 1,0294^{60}$$

$$u(60) \approx 37\,413\,797.$$

Selon ce modèle, la population en 2030, sera d'environ 37,4 millions d'habitants.

On procède comme pour l'Angola : le temps de doublement de la population est de 24 ans.

Les limites du modèle de Malthus

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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.

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.

Des modèles plus élaborés prévoient que la population mondiale atteindra environ 10 milliards d'humains en 2050. »

Savoir-faire : « 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.

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. »

Le **document 1** permet de comprendre la théorie de Malthus grâce à l'étude d'un extrait de son ouvrage *Essai sur le principe de population*.

Le **document 2** permet d'étudier l'évolution d'une population pour laquelle on connaît le taux de natalité et le taux de mortalité.

Le **document 3** permet d'aborder le choix d'un modèle.

Le **document 4** aborde les limites du modèle de Malthus et présente un autre modèle : celui de Verhulst.



1 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

On note P la population et R les ressources.

Au début du siècle : $P = 11$ millions et $R = 11$.

25 ans plus tard : $P = 22$ millions et $R = 22$.

25 ans plus tard : $P = 44$ millions et $R = 33$.

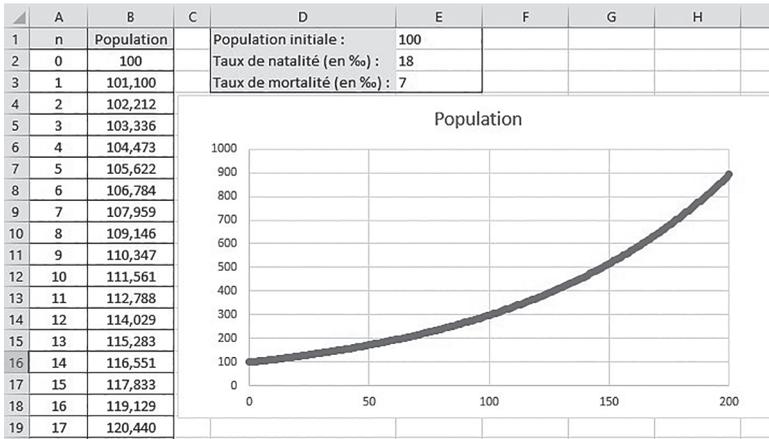
25 ans plus tard : $P = 88$ millions et $R = 44$.

À la fin du siècle : $P = 176$ millions et $R = 55$.

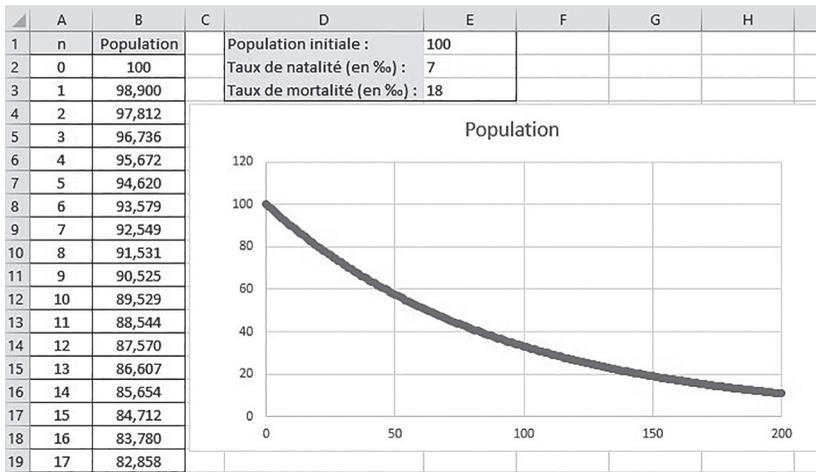
2 Pour mener une investigation

Exemple de correction

Lorsque le taux de natalité est supérieur au taux de mortalité, la population croît vers l'infini.



Lorsque le taux de natalité est inférieur au taux de mortalité, la population décroît vers 0.



On peut utiliser le fichier logiciel : si l'on ne tient compte que du taux de natalité et du taux de mortalité, la population mondiale, en 2050, sera d'environ 10 631 757 000 habitants.

On peut aussi calculer : $7\,794\,799\,000 \times 1,0104^{30}$.

3 Pour mener une investigation

Exemple de correction

1.

Année	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2015
Population mondiale (en milliards d'habitants)	3 018,3	3 682,5	4 439,6	5 309,7	6 126,6	6 929,7	7 349,5
Taux de variation (à 0,1 % près)		22 %	20,6 %	19,6 %	15,4 %	13,1 %	6,1 %

La population mondiale ne connaît pas une croissance exponentielle.

2. Taux de natalité et de mortalité en France métropolitaine (en pour mille) :

Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Taux de natalité	12,8	12,7	12,8	12,5	12,4	12,2	12,2	11,8
Taux de mortalité	8,5	8,6	8,6	8,5	8,8	8,7	8,5	9
Solde naturel	4,3	4,1	4,2	4	3,6	3,5	3,7	2,8

Excepté en 2014, le solde naturel diminue.

3. Production d'œufs (en tonnes) aux Philippines :

Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Production aux Philippines (en tonnes)	393 348	408 081	424 011	441 112	460 532	468 761
Variation absolue		14 733	15 930	17 101	19 420	8 229
Taux de variation (à 0,1 % près)		3,7 %	3,9 %	4 %	4,4 %	1,8 %

La production ne suit ni une croissance linéaire, ni une croissance exponentielle.

Exemple de correction des pistes de travail

Selon le modèle de Malthus, la population augmente de manière exponentielle et les ressources de manière linéaire.

Pour Verhulst (document 4), le modèle de Malthus ne peut convenir que dans le cas où la croissance dépend uniquement des causes constantes, comme le taux de natalité et le taux de mortalité (document 2).

On peut observer dans le document 3 que, pour la population mondiale, le solde naturel décroît (de 2008 à 2015) et que la croissance n'est pas exponentielle.

Toujours dans ce document, on observe que la croissance de la production d'œufs aux Philippines (de 2008 à 2013) ne suit pas une croissance linéaire ni une croissance exponentielle.

D'autres modèles existent. Celui de Verhulst pour la population de la Belgique prévoit un ralentissement de la croissance et un effectif qui tend à se stabiliser.

Pour la population mondiale, il existe plusieurs hypothèses de croissance (voir l'exercice 11 page 261).

CORRECTION DES EXERCICES

p. 259 ■

Vérifier ses connaissances

1 Questions à choix multiple

A- 2 : La variation absolue de la grandeur u entre deux paliers successifs est constante, égale à 2, donc u est une suite arithmétique de raison $r = 2$.

On en déduit : $u(n) = u(0) + nr = 3 + 2n$.

B- 4 : Le taux de variation t de la grandeur u est constant, égal à 0,5, donc u est une suite géométrique de raison $q = 1 + t = 1,5$.

On en déduit : $u(n) = u(0) \times q^n = 4 \times 1,5^n$.

C- 3 : Le taux de variation t de la population est constant, égal à 0,02, donc la grandeur u représentant la population est une suite géométrique de raison $q = 1 + t = 1,02$.

Alors, $u(n) = u(0) \times q^n = u(0) \times 1,02^n$.

Le temps de doublement est le plus petit entier n tel que $u(n) \geq 2 u(0)$, ce qui équivaut à $1,02^n \geq 2$.

Un tableau de valeurs de la suite u obtenu avec une calculatrice fournit la valeur de n cherchée : $n = 36$.

X	Y ₁
27	1.7069
28	1.741
29	1.7758
30	1.8114
31	1.8476
32	1.8845
33	1.9222
34	1.9607
35	1.9999
36	2.0399
37	2.0807

Le temps de doublement de cette population est donc de 36 ans.

D- 3 : Le taux de variation t est constant, égal à 0,01, donc la grandeur u représentant cette population est une suite géométrique de raison $q = 1 + \frac{1}{100} = 1,01$.

Pour tout entier naturel n ,
 $u(n) = u(0) \times q^n = 100 \times 1,01^n$.

D'où $u(50) = 100 \times 1,01^{50}$. On en déduit :
 $u(50) \approx 164,5$.

L'effectif de cette population au bout de 50 ans à l'unité près est 164.

2 Restituer les notions essentielles du cours

1. Une grandeur u varie de manière linéaire en fonction d'un palier entier n lorsque la variation absolue $u(n+1) - u(n)$ entre deux paliers n et $n + 1$ est constante.

2. Une grandeur u varie de manière exponentielle en fonction d'un palier entier n lorsque le taux de variation $\frac{u(n+1) - u(n)}{u(n)}$ entre deux paliers n et $n + 1$ est constant.

3. Le modèle démographique de Malthus fait l'hypothèse d'une croissance exponentielle de la population : il prévoit que l'effectif de la population croît vers l'infini si le taux de natalité est supérieur au taux de mortalité et qu'il décroît vers 0 sinon.

3 Comprendre un graphique

1. C'est le graphique **b**, car une variable discrète dont la croissance est linéaire est représentée graphiquement par une droite.

2. u est une suite arithmétique, donc $u(n) = u(0) + nr$, où r est la raison de la suite.

D'après le graphique, $u(0) = 1$ et $u(8) = 5$.

On en déduit : $u(n) = 1 + nr$, et ainsi $u(8) = 1 + 8r$.

Puisque $u(8) = 5$, alors $1 + 8r = 5$, soit $r = 0,5$.

On a donc : $u(n) = 1 + 0,5n$.

Ainsi, une équation de la droite passant par les points du nuage est $y = 0,5x + 1$.

4 Prévoir l'effectif d'une population

1. La variation absolue de cette population sur l'année est : $21\ 000 - 20\ 000 = 1\ 000$.

2. Le taux de variation de cette population sur l'année est : $\frac{21\ 000 - 20\ 000}{20\ 000} = 0,05$.

3. Si on fait l'hypothèse d'un modèle linéaire pour cette grandeur u , alors pour tout entier naturel n ,

$u(n) = u(0) + nr$, où r est la raison de la suite arithmétique.

La population de la ville en 2020 est 20 000, soit $u(0) = 20\ 000$.

$r = 1\ 000$, car la variation absolue est constante et égale à la raison de la suite.

D'où : $u(n) = 20\ 000 + 1\ 000 n$.

L'année 2030 est l'année de rang $n = 10$.

$u(10) = 20\ 000 + 1\ 000 \times 10 = 30\ 000$.

La population de cette ville en 2030 sera alors de 30 000 habitants.

4. Si on fait l'hypothèse d'un modèle exponentiel pour cette grandeur u , alors pour tout entier naturel n , $u(n) = u(0) \times q^n$, où q est la raison de la suite géométrique.

Le taux de variation t étant constant, égal à 0,05, on a alors $q = 1 + t = 1,05$.

D'où : $u(n) = 20\ 000 \times 1,05^n$.

$u(10) = 20\ 000 \times 1,05^{10}$, soit $u(10) \approx 32\ 578$, à l'unité près.

La population de cette ville en 2030 sera alors de 32 578 habitants.

5 Retour sur les problématiques

Nous conseillons de faire appel à la fiche méthode (rabat V) qui comporte des éléments pouvant guider les élèves dans leur expression orale.

• **Comment les mathématiques permettent-elles de modéliser la dynamique des systèmes vivants afin de décrire leur évolution ?**

Les mathématiques modélisent la dynamique des systèmes vivants à l'aide de suites. Les deux principaux modèles, le modèle linéaire et le modèle exponentiel, utilisent respectivement des suites arithmétiques et des suites géométriques. On reconnaît un modèle possible avec des propriétés numériques (liées à la variation absolue et au taux de variation) ou avec des propriétés graphiques.

• **Quelles sont les différentes étapes de la démarche de modélisation mathématique ?**

La première étape de cette démarche est le recueil de données.

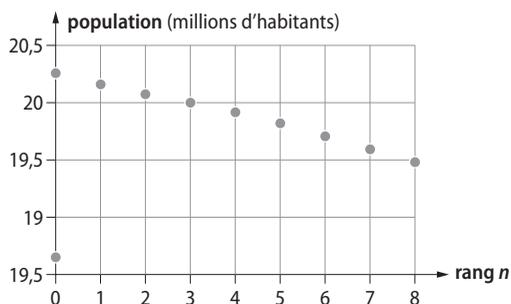
À partir de ces données et à l'aide d'outils numériques ou graphiques, on propose un modèle qui est en adéquation avec ces données : ce modèle est en général choisi parmi des modèles connus.

Le modèle étant fixé, on peut alors l'utiliser pour faire des prévisions.

Exercice similaire

7 Un modèle démographique linéaire pour la Roumanie

1.



2. On calcule dans un tableau les variations absolues d'un palier à l'autre de 2010 à 2018.

Année	2010	2011	2012	2013	2014
Rang n	0	1	2	3	4
Population (en millions d'habitants)	20,25	20,15	20,06	19,98	19,91
Variation absolue		-0,10	-0,09	-0,08	-0,07

Année	2015	2016	2017	2018
Rang n	5	6	7	8
Population (en millions d'habitants)	19,82	19,7	19,59	19,47
Variation absolue	-0,09	-0,12	-0,11	-0,12

La variation absolue d'un palier à l'autre est quasiment constante, donc on peut estimer que la décroissance de la population relève d'un modèle linéaire.

3. a. $u(0) = 20,25$ et $u(8) = 19,47$.

b. Puisqu'on considère un modèle linéaire, u est une suite arithmétique. On peut donc écrire : $u(n) = u(0) + nr$, où r est la raison de la suite.

Ainsi, $u(n) = 20,25 + nr$.

$u(8) = 20,25 + 8r$, et $u(8) = 19,47$ équivaut à : $20,25 + 8r = 19,47$, soit $r = -0,0975$.

D'où l'expression de $u(n)$ en fonction de n :

$$u(n) = 20,25 - 0,0975n.$$

c. $2025 = 2010 + 15$, donc 2025 est l'année de rang 15.

Alors, $u(15) = 20,25 - 0,0975 \times 15 = 18,7875$.

On peut estimer à 18,79 millions d'habitants la population de la Roumanie en 2025.

S'entraîner

8 Population des pays développés

On estime que le taux de croissance annuel est constant, égal à 0,5 % : on modélise donc l'évolution de la population par un modèle exponentiel. Si on note $u(n)$ la population lors de l'année n , alors u est une suite géométrique de raison $1 + \frac{0,005}{100} = 1,005$.

Alors, $u(n) = u(0) \times 1,005^n$.

a. La population double lorsque $u(n) \geq 2u(0)$, ce qui donne : $1,005^n \geq 2$.

Un tableau de valeurs de la suite obtenu avec une calculatrice fournit la valeur de n cherchée : $n = 139$.

La population d'un de ces pays double au bout de 139 ans.

X	Y ₁
137	1.9804
138	1.9903
139	2.0002
140	2.0102
141	2.0203

b. La population triple lorsque $u(n) \geq 3u(0)$, ce qui donne : $1,005^n \geq 3$.

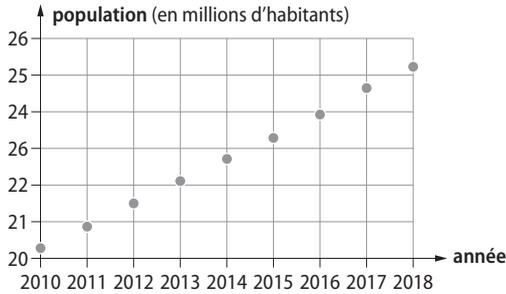
Un tableau de valeurs de la suite obtenu avec une calculatrice fournit la valeur de n cherchée : $n = 221$.

La population d'un de ces pays triple au bout de 221 ans.

X	Y ₁
215	2.9222
216	2.9368
217	2.9514
218	2.9662
219	2.981
220	2.9959
221	3.0109
222	3.026

9 Modèle démographique du Cameroun

1. Pour une lecture facile du graphique, on fait démarrer l'axe des abscisses à 2010 et l'axe des ordonnées à 20.



2. Les points du nuage de points sont quasiment alignés : on peut donc estimer que le modèle linéaire est adapté pour décrire l'évolution de la population du Cameroun entre 2010 et 2018.

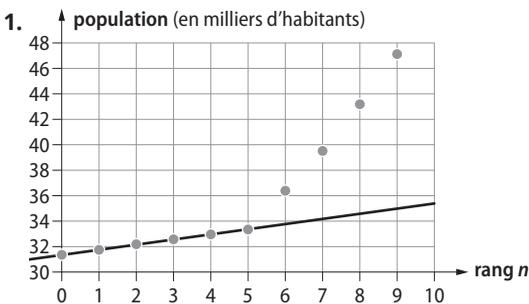
3. a. Le modèle étant linéaire, la suite u est arithmétique, et on peut écrire, pour tout entier naturel n : $u(n) = u(0) + nr$, où r est la raison de la suite. Puisque $u(0) = 20,3$, on a : $u(n) = 20,3 + nr$.

$u(8) = 25,2$ équivaut à $20,3 + 8r = 25,2$ soit $8r = 4,9$ et $r = 0,6125$.

b. On en déduit : $u(n) = 20,3 + 0,6125n$.

c. $2030 = 2010 + 20$, donc on peut estimer selon ce modèle la population du Cameroun en 2030 en calculant $u(20)$: $u(20) = 20,3 + 0,6125 \times 20 = 32,55$. On peut estimer la population du Cameroun en 2030 à 32,55 millions d'habitants.

10 Évolution de la population d'une ville



2. a.

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rang n	0	1	2	3	4	5
Population (en milliers d'habitants)	31,3	31,7	32	32,5	32,9	33,3
Variation absolue		0,4	0,3	0,5	0,4	0,4

b. Entre 2010 et 2015, la variation absolue d'un palier au suivant est quasiment constante (0,3 ; 0,4 ; 0,5), donc on peut considérer que la croissance de la population est linéaire.

c. Avec la calculatrice, on obtient une équation de la droite d'ajustement des six premiers points du nuage : $y = 0,40x + 31,28$.

Réglin

$$y = ax + b$$

$$a = 0,4028571429$$

$$b = 31,27619048$$

d. On trace cette droite sur le graphique de la question 1.

e. $2019 = 2010 + 9$, donc 2019 est l'année de rang 9.

On utilise le modèle linéaire, donc l'équation de la droite d'ajustement déterminée plus haut donne : $u(n) = 0,40n + 31,28$.

$u(9) = 0,40 \times 9 + 31,28 = 34,88$, donc on peut estimer la population de cette ville en 2019 à 34,88 milliers d'habitants.

f. La population de la ville est de 47,1 milliers d'habitants en 2019, donc l'hypothèse selon laquelle le modèle linéaire reste valable jusqu'en 2019 est fautive.

3. a. Taux de variation entre deux paliers successifs, entre 2015 et 2019.

Année	2015	2016	2017	2018	2019
Rang n	5	6	7	8	9
Population (en milliers d'habitants)	33,3	36,3	39,5	43,2	47,1
Taux de variation		9 %	8,8 %	9,4 %	9 %

b. Le taux de variation d'un palier au suivant est quasiment constant entre 2015 et 2019, autour de 9 %, donc on peut considérer qu'entre 2015 et 2019, l'évolution de la population est exponentielle.

11 Plusieurs scénarios pour la planète

1. Tout d'abord, de 1950 à 2030, les quatre scénarios suivent un modèle linéaire. C'est à partir de 2030 que les scénarios se différencient.

Le modèle lié à l'hypothèse de fertilité actuelle est clairement un modèle de croissance exponentielle : il annonce un effectif de près de 30 milliards d'habitants en 2100 !

Le modèle lié à l'hypothèse de fertilité haute est plutôt un modèle linéaire.

Le modèle du scénario médian est plutôt un modèle linéaire.

Le modèle lié à l'hypothèse de fertilité basse est un modèle de décroissance difficile à identifier.

2. Ces deux modèles de croissance de la population vont être limités par les ressources disponibles sur la Terre. Celle-ci est-elle capable de nourrir 30 milliards d'habitants ?

12 Population de lapins et modèle de Verhulst

1. a. $u(n)$ est la population de lapins après n mois et cette population de lapins augmente de 5 % par mois donc $u(n+1) = u(n) + 0,05u(n)$.

b. Voir la capture à la question 2. b. et le fichier logiciel.

2. a. $v(n+1) = v(n) + 0,05 v(n) \left(1 - \frac{v(n)}{500}\right)$.

Donc en développant :

$$v(n+1) = v(n) + 0,05 v(n) - \frac{0,05v(n)^2}{500};$$

soit $v(n+1) = v(n) + 0,05 v(n) - 0,0001 v(n)^2$.

Tant que $v(n)$ est petit, $0,0001 v(n)^2$ est très petit. Donc les deux modèles donnent des résultats très proches.

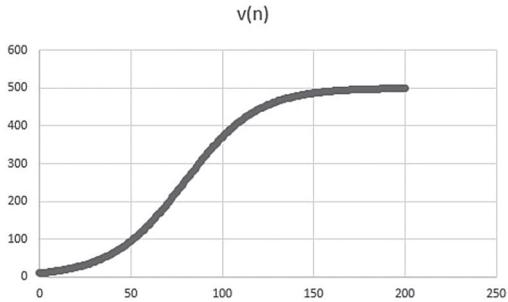
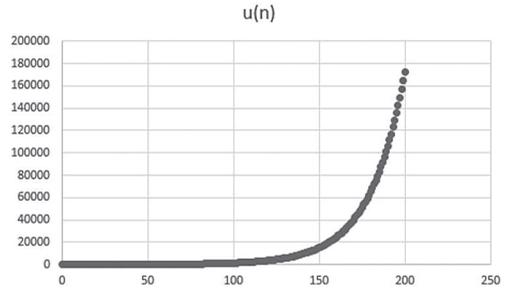
b. Voir le fichier logiciel.

	A	B	C
1	n	u(n)	v(n)
2	0	10	10
3	1	10,5	10,49
4	2	11,03	11,00
5	3	11,58	11,54
6	4	12,16	12,11
7	5	12,76	12,70
8	6	13,40	13,31
9	7	14,07	13,96
10	8	14,77	14,64
11	9	15,51	15,35
12	10	16,29	16,10
13	11	17,10	16,87
14	12	17,96	17,69
15	13	18,86	18,54
16	14	19,80	19,44
17	15	20,79	20,37

c. $u(200) \approx 172\,926$ et $v(200) \approx 499$.

Les valeurs $v(n)$ sont de plus en plus proches de 500.

d.



13 Un texte de Quetelet

1. Comme Malthus, Quetelet pense que, sans obstacles, une population augmente de façon exponentielle.

2. Quetelet pense qu'en présence d'obstacles, la population tend à devenir stationnaire (on peut illustrer ceci avec le modèle de Verhulst de l'exercice 12).

3. Quetelet fait un rapprochement entre la dynamique des populations et celle des corps en mécanique.

14 Modélisation de la population des États-Unis au XIX^e siècle

1. On calcule les taux de variation d'un palier à l'autre.

Année	1790	1800	1810
Population	3 929 827	5 305 925	7 239 814
Taux de variation (à 0,1 % près)		35,1 %	36,4 %

Année	1820	1830	1840
Population	9 638 131	12 866 020	17 062 566
Taux de variation (à 0,1 % près)	33,1 %	33,5 %	32,6 %

Les taux de variation sont très proches, donc on peut estimer que la croissance de la population est exponentielle.

$$2. \frac{17\,062\,566 - 3\,929\,827}{3\,929\,827} \approx 3,342 \text{ à } 10^{-3} \text{ près.}$$

Entre 1790 et 1840, la population a augmenté d'environ 334,2 %.

3. a. La suite u est géométrique. On note q sa raison.

En 50 ans, la population a été multipliée par environ 4,342 donc $q^{50} \approx 4,342$.

On en déduit que $q \approx 4,342^{\frac{1}{50}}$, soit $q \approx 1,03$ à 10^{-3} près.

On considère désormais que $q = 1,03$.

$$u(n+1) = 1,03 u(n).$$

D'où : $u(n) = u(0) \times 1,03^n$, soit $u(n) = 3\,929\,827 \times 1,03^n$.

b. On cherche le plus petit entier naturel n tel que $1,03^n \geq 2$.

Avec une calculatrice, on obtient $n = 24$.

Tous les 24 ans, la population double. Le temps de doublement est donc de 24 ans.

c. $2\,020 = 1\,790 + 230$. On calcule $u(230)$.

$$u(230) = 3\,929\,827 \times 1,03^{230} \approx 3\,523\,182\,291.$$

Selon ce modèle, la population des États-Unis en 2020 serait d'environ 3,5 milliards d'habitants.

En 2018, la population des États-Unis était d'environ 327 millions.

Le modèle d'une croissance exponentielle, qui convenait sur la période 1790-1840, ne convient pas pour faire une estimation sur un plus long terme

15 Production de fromage en France

1. Les points du nuage sont presque alignés. On peut donc envisager un modèle linéaire.

2. a. $1975 = 1965 + 10$

$$\text{et } u(10) = 35\,611 \times 10 + 613\,901 = 970\,011.$$

Selon ce modèle, en 1975, la production était de 970 011 tonnes.

b. $1987 = 1965 + 22$

$$\text{et } u(22) = 35\,611 \times 22 + 613\,901 = 1\,397\,343.$$

Selon ce modèle, en 1987, la production était de 1 397 343 tonnes.

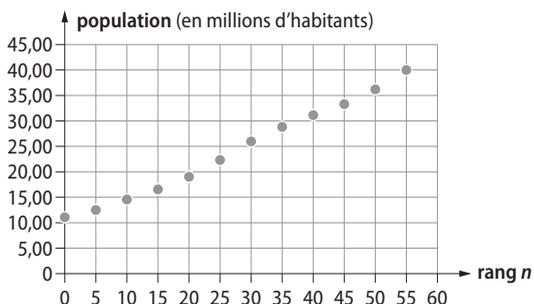
3. Selon ce modèle :

Année	n	Production (tonnes)
1986	21	1 361 732
1990	25	1 504 176
1995	30	1 682 231
2000	35	1 860 286
2005	40	2 038 341
2010	45	2 216 396
2013	48	2 323 229

On peut constater que les productions données par le modèle ne conviennent plus à partir de 1985.

16 Préparation BAC L'Algérie de 1960 à 2015

1.



2. On calcule les taux de variation d'un palier à l'autre.

Année	1960	1965	1970	1975
Population (en millions d'habitants)	11	12,6	14,5	16,6
Taux de variation (à 0,1 % près)		14,5 %	15,1 %	14,5 %

Année	1980	1985	1990	1995
Population (en millions d'habitants)	19,2	22,4	25,8	28,8
Taux de variation (à 0,1 % près)	15,7 %	16,7 %	15,2 %	11,6 %

Les taux de variation sont très proches, donc on peut estimer que, sur cette période, la croissance de la population est exponentielle.

3. $v(0) = 11$ et $v(35) = 28,8$.

a. $v(35) = 11 \times q^{35}$.

b. $11 \times q^{35} = 28,8$ donc $q^{35} = \frac{28,8}{11}$.

Par conséquent, $q = \left(\frac{28,8}{11}\right)^{\frac{1}{35}}$, soit $q \approx 1,028$.

c. $v(n) = 11 \times 1,028^n$

$2\ 002 = 1\ 960 + 42$. On calcule $v(42)$:

$v(42) = 11 \times 1,028^{42} \approx 35,1$.

Selon ce modèle, en 2002, la population de l'Algérie était de 35,1 millions d'habitants.

4.

Année	2000	2005	2010	2015
Population (en millions d'habitants)	31	33,2	36	39,7
Taux de variation (à 0,1 % près)		7,1 %	8,4 %	10,3 %

Les taux de variation ne sont pas proches de ceux calculés sur la période de 1965 à 1995, et ils ne sont pas proches les uns des autres. On ne peut pas considérer que le modèle précédent est resté valable pour les années 2000 à 2015. Et on ne peut pas considérer que sur cette période la croissance est exponentielle.

5. a. On utilise la calculatrice.

En arrondissant les coefficients à 0,01 près, une équation de la droite d'ajustement des cinq derniers points du nuage est : $y = 0,54x + 9,62$.

b. $2\ 019 = 1\ 960 + 59$

$y = 0,54 \times 59 + 9,62 = 41,48$.

Selon ce modèle, en 2019, il y avait 41,48 millions d'habitants en Algérie.

L'intelligence artificielle

LE PROGRAMME

3. Une histoire du vivant

3.5 – L'intelligence artificielle

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 réservée 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	
<p>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.</p>	

JE RETROUVE CE QUE JE SAIS DÉJÀ | p. 264

● SITUATION 1

Cette première activité permet de remobiliser des notions vues en SNT en classe de Seconde, et notamment la notion de pixel. Elle permet également d'introduire la numérisation en tant que conversion en une suite de valeurs numériques (ici 3 valeurs entières par pixel) d'une donnée analogique.

➤ Exemple de réponse attendue

$$N = 1\,920 \times 1\,024 = 1\,966\,080$$

La taille de l'image, non compressée, sera de 1 966 080 pixels (soit presque 2 Mégapixels).

➤ Complément

On pourrait également demander à l'élève de calculer la taille en octets de cette image non compressée, sachant qu'un pixel est codé par 3 octets.

➤ En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique, on abordera le volume occupé (en octets) par différents types de données, telles que les vidéos ou les fichiers textes (**activité 2**).

● SITUATION 2

Il s'agit de s'appuyer sur la culture numérique de l'élève (culture qu'il a notamment pu consolider en SNT en Seconde) afin de montrer la diversité des données informatiques.

➤ Exemple de réponse attendue

Les données informatiques véhiculées sur Internet peuvent être par exemple :

- du texte (ex. : lors de l'envoi d'un mail) ;
- des images (ex. : images dans une page web) ;
- des vidéos (ex. : vidéos en « streaming »).

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique l'élève apprendra d'abord à attribuer un ordre de grandeur au volume occupé par chaque type de donnée informatique. Il devra ensuite être capable de débattre des enjeux environnementaux et sociétaux associés à l'essor de ces données.

● SITUATION 3

Que ce soit en SNT, en mathématiques, voire en sciences physiques ou en SVT, l'élève a déjà été amené à coder en Python, depuis la classe de Seconde. La définition d'une fonction (def) fait normalement partie de ses acquis. L'objectif est de lui rappeler qu'un langage informatique permet de coder un algorithme en respectant une syntaxe.

► Exemple de réponse attendue

La valeur suivante apparaîtra dans la console Python : 29.3847

► En classe de T^{ale} enseignement scientifique

En classe de Terminale enseignement scientifique, l'élève aura, dans ce chapitre, l'occasion de réaliser ou d'étudier de petits programmes écrits en Python. Il sera également amené à réfléchir à la nature des bugs informatiques et à les repérer.

ACTIVITÉS

Bien qu'il fasse partie du thème « Une histoire du vivant », ce chapitre est en réalité consacré à l'informatique et à la place croissante prise par les données informatiques et l'intelligence artificielle dans notre quotidien.

Comme dans d'autres chapitres, on introduit les concepts par le biais de l'histoire des sciences. Ainsi, dans l'**activité 1**, on part de la « préhistoire » de l'informatique pour arriver à la définition moderne de ce qu'est un ordinateur, par des exemples concrets, tirés du quotidien de l'élève.

L'**activité 2** est entièrement consacrée aux données informatiques et à la place qu'elles occupent dans notre société moderne. En particulier, l'élève est sollicité pour réaliser des calculs portant sur les volumes représentés et réfléchir aux enjeux associés.

Parmi les données informatiques, les programmes, écrits dans des langages informatiques, occupent une place particulière. L'**activité 3** leur est consacrée. Après une introduction par deux documents historiques, l'élève sera amené à

rechercher des « bugs » dans des exemples de programmes (écrits en Python notamment).

L'**activité 4** présente des exemples de techniques de programmation permettant de simuler dans des cas particuliers l'intelligence humaine. Cette programmation impose souvent le calcul de probabilités.

L'**activité 5** s'intéresse au rôle joué dans ce domaine par l'utilisation d'une méthode mathématique appelée l'inférence bayésienne. Cette méthode d'induction est naturellement appliquée par notre propre cerveau.

p. 266 ■ **ACTIVITÉ 1**

Les ordinateurs, d'hier à aujourd'hui

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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 *a minima* d'un processeur et d'une mémoire vive. »

Savoir-faire : « Analyser des documents historiques relatifs au traitement de l'information et à son automatisation. 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...). »

Le **document 1** présente le métier à tisser Jacquard comme étant l'ancêtre de l'ordinateur moderne (la machine suit bien une liste d'instructions mais ne dispose pas de mémoire vive).

Le **document 2** introduit la « machine de Turing », qui aboutira plus tard aux premiers ordinateurs. Avec le document 1, il inscrit le concept d'ordinateur dans l'histoire des sciences et techniques.

Le **document 3** décrit la composition d'un ordinateur, en insistant en particulier sur la présence obligatoire d'un processeur (qui traite les données) et d'une mémoire vive (qui les stocke temporairement en vue de les traiter). Le stockage des données sera développé dans l'activité suivante.

Enfin, le **document 4** incite l'élève à réfléchir à la présence des ordinateurs dans son environnement immédiat. L'objectif est de montrer que les ordinateurs ne se limitent pas aux « ordinateurs de bureau », mais qu'ils sont également présents dans leurs appareils électroménagers, leur téléphone, etc.

► Exemple de correction des pistes de travail

On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignant-e.

1. Le métier à tisser de Jacquard est certes capable de traiter une liste d'instructions (inscrite sur un ruban perforé) mais ne dispose pas de mémoire. Or, selon Alan Turing, un ordinateur doit également être doté d'une mémoire, ce dont les métiers Jacquard étaient dépourvus.

On pourrait également relever que les métiers à tisser ne sont pas capables de réaliser des calculs, or selon Alan Turing, un ordinateur doit être capable de réaliser ce type de tâche.

2. Le principal périphérique d'entrée d'un smartphone est son écran tactile, grâce auquel l'utilisateur peut taper du texte, exécuter des applications, etc.

Mais d'autres modes de saisie sont possibles : saisie vocale (le microphone est alors le périphérique d'entrée utilisé).

Un smartphone peut disposer par ailleurs de nombreux capteurs (inclinomètres et accéléromètres par exemple) qui peuvent également être utilisés comme périphériques d'entrée.

Les principaux périphériques de sortie d'un smartphone sont son écran, qui affiche les informations utiles à l'utilisateur, et son haut-parleur, qui diffuse du son.

3. Voici les objets embarquant un ordinateur, croisés par Sarah :

- un réveil matin (programmable par l'utilisateur, par exemple pour programmer l'alarme) ;
- une climatisation (programmable par l'utilisateur, par exemple pour programmer des plages horaires) ;
- un four (programmable par l'utilisateur, par exemple pour programmer la fin de la cuisson) ;
- GPS (programmable par l'utilisateur, par exemple pour définir un trajet) ;
- un badge ou un portique d'entrée (programmable par la personne gérant les badges au lycée).

Dans une salle de classe :

- l'ordinateur du professeur et des élèves (programmable par l'utilisateur) ;
- un vidéoprojecteur (programmable par un technicien, qui peut mettre à jour le logiciel interne au vidéoprojecteur) ;
- une horloge électronique (programmable par l'utilisateur, par exemple pour définir une alarme).

p. 268 ■ **ACTIVITÉ 2**

Des données de natures diverses

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. »

Savoir-faire : « Connaître l'ordre de grandeur de la taille d'un fichier image, son, vidéo. Savoir calculer la taille en octets d'une page de texte (en ASCII et non compressé). »

Le **document 1** traite la notion de « numérisation » des données. Il est rappelé que toutes les données informatiques sont ramenées à une ou plusieurs valeurs numériques codées en binaire. Est également évoqué le codage selon la norme ASCII du texte (où chaque caractère est codé par un octet), qui apparaît dans le programme.

Le **document 2** montre comment les données sont stockées sous la forme de fichiers. Ce document fait en particulier écho au savoir-faire consistant à connaître l'ordre de grandeur de la taille de fichiers en fonction du type de données. Enfin, le cas des programmes exécutables est également évoqué, mais sera traité en détail dans l'activité suivante.

Le **document 3** montre l'évolution des moyens de stockage. Les volumes de données, toujours plus importants, que peuvent stocker ces supports sont à mettre en relation avec les ordres de grandeur donnés dans le document 2.

Enfin, le **document 4** aborde la question du « big data » et des enjeux sociétaux et économiques qui y sont liés. Certains de ces enjeux sont liés au mode de stockage des données (en particulier dès qu'il s'agit du cloud), ce qui le lie au document précédent.

► Exemple de correction des pistes de travail

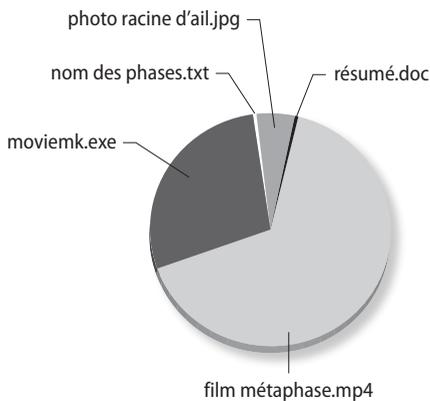
On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignante.

1. On commence par convertir toutes les tailles en octets.

On rappelle qu'un Ko représente 1 024 octets, et qu'un Mo représente 1 024 Ko, soit 1 048 576 octets.

Nom du fichier	Taille (en octets)
film métaphase.mp4	8 210 350
moviemk.exe	3 554 673
nom des phases.txt	44
photo racine d'ail.jpg	678 912
résumé.doc	26 624

À l'aide d'un tableur, on réalise à présent un diagramme :



On peut faire remarquer à l'élève la part infime représentée par les deux fichiers textes (aux formats .txt et .doc) sur le diagramme. Ces fichiers prennent très peu de place par rapport aux fichiers vidéo qui sont eux très volumineux.

2. D'après le document 3, un disque Blu-ray peut contenir entre 7 et 128 Go, soit 7×10^9 octets et $1,28 \times 10^{11}$ octets.

Un roman contenant 500 000 caractères, occupera, si le texte est codé selon la norme ASCII, 500 000 octets, soit 5×10^5 octets.

Un disque Blu-ray de 7 Go pourra donc contenir $\frac{8,33 \times 10^9}{5 \times 10^5} = 17\,660$ romans.

Un disque Blu-ray de 128 Go pourra contenir $\frac{1,37 \times 10^{11}}{5 \times 10^5} = 274\,000$ romans.

3. Le stockage sur le cloud repose sur des « data centers » très gourmands en énergie, ce qui contribue entre autres aux émissions de gaz à effet de serre (quelle que soit la source d'énergie utilisée). Une grande partie de cette énergie étant utilisée pour assurer leur refroidissement, on peut envisager de les délocaliser dans des pays où le climat est froid. On peut également adopter, en tant que consommateurs de ces services, des comportements écoresponsables, en limitant le recours au cloud, par exemple en supprimant du cloud les documents (les mails notamment) dont on n'a plus l'usage, en redimensionnant les photographies pour qu'elles occupent moins de place, et en utilisant quand cela est possible des supports physiques (clés USB, disques, etc.).

Le cloud pose également des problèmes éthiques. Les données (et notamment les données personnelles) stockées sur le cloud peuvent être récupérées par des personnes mal intentionnées (piratage informatique), voire par des entreprises (espionnage industriel, data mining des données personnelles) ou même des états (traçage et surveillance des citoyens...). Pour limiter ces problèmes, il faut favoriser les services de cloud qui respectent les réglementations protégeant les données personnelles (RGPD notamment) et, si possible, hébergés sur le territoire national. Le consommateur utilisant ces services a lui intérêt à éviter de stocker des données personnelles sur le cloud.

p. 270 ■ ACTIVITÉ 3

Traitement de l'information par des machines

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. 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 bugs). Ces erreurs peuvent conduire un programme à avoir un comportement inattendu et entraîner des conséquences graves. »

Savoir-faire : « Étant donné un programme très simple, proposer des jeux de données d'entrée permettant d'en tester toutes les lignes. Corriger un algorithme ou un programme bogué simple. »

Le **document 1** présente le premier traitement historique massif de données par une machine mécanographique, ancêtre de l'ordinateur, et du gain de temps généré.

Le **document 2** montre la complexité croissante des programmes informatiques et l'impact d'erreurs de codage sur la vie des utilisateurs avec, parfois, des conséquences graves supportées par un très grand nombre d'individus, d'où des enjeux importants.

Le **document 3** explique l'origine du terme bogue et précise les sources potentielles d'erreurs (algorithmiques ou syntaxiques).

Le **document 4** propose un programme simple qui ne donne pas les résultats attendus et qui doit donc être débogué. Une fiche d'aide à l'utilisation du langage Python est disponible à la page 294.

4 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

• L'erreur d'Eric est d'origine syntaxique. La fonction `input` permet d'affecter à la variable `N`, une valeur de type chaîne de caractère (`str`). Le programme considère donc que le contenu de la variable `N` est un caractère et non une valeur numérique. Lorsque `i = 5`, le caractère `3` est par exemple affiché 5 fois au lieu d'être multiplié par 5.

• Pour corriger le programme, la valeur affectée à `N` doit être convertie en valeur entière. C'est le rôle de la fonction `int`. Il faut donc écrire à la première ligne du programme :

```
N = int(input("Donner un nombre entier"))
```

• Pour afficher les 10 résultats de la table de multiplication, le «range» de la deuxième ligne du programme doit être modifié. Il faut donc écrire à la deuxième ligne du programme :

```
for i in range(1,11):
```

La valeur `i` prendra dans ce cas les valeurs entières croissantes de 1 jusqu'à 10 (la dernière valeur 11 est exclue).

► Exemple de correction des pistes de travail

1. En 1880, la méthode utilisée permettait de trier :
$$\frac{50\,189\,209}{8} \approx 6\,273\,651 \text{ habitants par année.}$$

En 1890, la méthode d'Hollerith a permis de trier :
$$\frac{62\,979\,766}{3} \approx 20\,993\,255 \text{ habitants par année.}$$

Si en 1890, on avait utilisé l'ancienne méthode, le temps mis aurait été de $\frac{62\,979\,766}{6\,273\,651} \approx 10$ ans. Le gain de temps est donc de $10 - 3 = 7$ ans !

En 2019, les États-Unis dénombraient 327 200 000 habitants et la méthode d'Hollerith classait 20 993 255 habitants par année. Le temps nécessaire au dépouillement de la population actuelle avec cette méthode mécanographique serait donc :

$$\frac{327\,200\,000}{20\,993\,255} \approx 15,6 \text{ années.}$$

2. On propose ici divers exemples :

• Le 4 juin 1996, la fusée Ariane 5 explose en vol 40 secondes après son décollage en détruisant sa charge utile d'une valeur de 370 millions de dollars. En cause, un bogue dans le système de navigation.

• Le 3 décembre 1999, la sonde Mars Polar Lander a coupé ses moteurs à 40 mètres de hauteur, entraînant la destruction de l'atterrisseur sur la planète Mars. Les tests de fonctionnement du logiciel de bord n'avaient pas eu le temps d'être réalisés car il fallait respecter le planning de lancement.

• Le 28 août 2009, l'ordinateur de bord de la voiture Toyota Lexus ES350 s'est révélé défectueux et a entraîné le décès de quatre personnes. La voiture a atteint la vitesse de 190 km/h sans le consentement de son conducteur.

• Le 24 avril 2015, durant 2 heures, tous les points de vente des États-Unis et du Canada de l'entreprise Starbucks n'ont pas pu encaisser les commandes des clients en raison d'une mise à jour défectueuse du logiciel de gestion.

3. Seul le dernier produit (15) est affiché. L'origine du bogue est maintenant algorithmique car la commande `print` ne se trouve plus dans la boucle d'exécution de la commande `for`.

p. 272 ■ **ACTIVITÉ 4**

L'intelligence artificielle

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. 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. 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. »

Savoir-faire : « Analyser des documents relatifs à une application de l'intelligence artificielle. Utiliser une courbe de tendance (encore appelée courbe de régression) pour estimer une valeur inconnue à partir de données d'entraînement. Analyser un exemple d'utilisation de l'intelligence artificielle : identifier la source des données utilisées et les corrélations exploitées. Sur des exemples réels, reconnaître les possibles biais dans les données, les limites de la représentativité. Expliquer pourquoi certains usages de l'IA peuvent poser des problèmes éthiques. »

Le **document 1** illustre les premiers combats intellectuels livrés entre un être humain et une machine à travers une partie de jeu d'échecs. Il explique certaines méthodes mathématiques simulant une intelligence.

Le **document 2** montre comment une IA peut prévoir un résultat en utilisant la méthode mathématique de régression linéaire.

Le **document 3** explique de manière simplifiée comment une IA peut prendre une décision après une période d'apprentissage basée sur l'analyse de données choisies.

Le **document 4** fait référence à la reconnaissance faciale où l'IA est particulièrement utilisée pour extrapoler des données personnelles d'où

des enjeux importants associés à ces nouvelles technologies.

► Exemple de correction des pistes de travail

1. La tour blanche vaut 5 points et le cavalier 3 points. De plus, si la tour prend le cavalier, le roi ou le fou noir s'emparera de la tour. L'IA ne se lancera pas dans cette attaque car elle perdra 2 points.

2. La droite de régression passe par les points de coordonnées (3 ; 15) et (6 ; 35). Pour obtenir les valeurs de a et b , on doit résoudre le système d'équations suivant :

$$3 \times a + b = 15 ; \text{ et } 6 \times a + b = 35 ;$$

$$\text{d'où } a = \frac{20}{3} \text{ et } b = -5.$$

Ainsi la droite de régression linéaire a pour équation : $Y = \frac{20}{3} \times X - 5$.

Lorsque $X = 7$, $Y = \frac{20}{3} \times 7 - 5 \approx 41,7$. Le chiffre d'affaire de la 7^e année sera donc voisin de 41 700 euros.

3. $A = 25$ et $S = 1$. Soit $80 \times 1 - 3 \times 25 = 5$. Donc $B = 5$. Cette valeur se rapproche plus de 10 (café) que de 20 (thé). D'après notre modèle, cette femme de 25 ans préfère le café.

4. L'identification faciale permet aujourd'hui de connaître en particulier le sexe, l'âge, le poids et la taille d'une personne. Ces éléments donnent des informations précises sur notre état de santé. On peut calculer ainsi l'indice de masse corporelle. Ces données médicales sont personnelles et enfreignent le droit à la vie privée.

Des entreprises commerciales peuvent facilement nous reconnaître dans la rue ou un magasin et nous proposer en fonction de notre localisation des publicités ciblées.

5. On peut proposer le tableau suivant :

Document	Source de données	Corrélation	Biais possible	Limite de représentativité
1	Mouvement des pièces du joueur humain	Comparaison des mouvements des pièces par l'IA avec des millions de parties	Un coup au hasard joué par l'humain et non compréhensible par l'IA	L'IA ne tient pas compte de l'état psychologique du joueur humain (tension, agacement, manque de concentration...)
2	Chiffre d'affaires	Linéaire	Un CA qui s'écarte trop de la courbe de tendance	L'interpolation linéaire est trop simple pour rendre compte de ce type de phénomène (plutôt utiliser un polynôme de degré n pour n points)
3	Sondage	Succession d'approximations linéaires	Un trop grand nombre de personnes qui mentent	Les deux paramètres (âge et sexe) sont insuffisants pour rendre compte du goût pour ces boissons. On pourrait rajouter le pays, le niveau social...
4	Visage : calculs de distance entre des points du visage	Correspondance entre un visage enregistré dans une base de données et le visage étudié	Un visage grimaçant ne peut être reconnu	Angle de vue, luminosité

p. 274 ■ **ACTIVITÉ 5**

L'inférence bayésienne

Cette activité a pour objectif de traiter les parties suivantes du programme :

Savoirs : « 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. »

Savoir-faire : « 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. »

Le **document 1** présente l'inférence bayésienne comme une technique d'induction utilisée par notre cerveau.

Le **document 2** introduit un mode de présentation des données sous la forme d'un tableau de contingence.

Le **document 3** permet de montrer aux élèves, à partir d'un exemple de test médical, un résultat qui n'est pas intuitif au départ. Lorsqu'un patient est positif à un test, il n'est pas forcément malade !

2 Pour mener une investigation

► Exemple de correction

- Le tableau demandé serait celui-ci :

Test	Malade	Sain	Total
Positif	85 (Vrai Positif)	53 (Faux Positif)	138
Négatif	7 (Faux Négatif)	855 (Vrai Négatif)	862
Total	92	908	1 000

- La fréquence des vrais positifs est :

$$F(\text{VP}) = \frac{85}{138} \approx 61,6 \%$$

- Comme $61,6 < 90$, le praticien ne pourra pas se faire aider par cette IA.

► Exemple de correction

• On propose le tableau suivant :

Test	Malade	Sain
Positif	$F(VP) = \frac{990}{992}$	$F(FP) = \frac{2}{992}$
Négatif	$F(FN) = \frac{3}{8}$	$F(VN) = \frac{5}{8}$

• $A = \frac{1}{10\,000} \times \frac{990}{992} = \frac{990}{9\,920\,000}$

et $B = \left(1 - \frac{1}{10\,000}\right) \times \frac{2}{992} = \frac{9\,999 \times 2}{9\,920\,000}$

$\frac{A}{A+B} = \frac{990}{990 + 9\,999 \times 2} \approx 4,7 \%$

• À l'aide du schéma ci-dessous, on trouve :

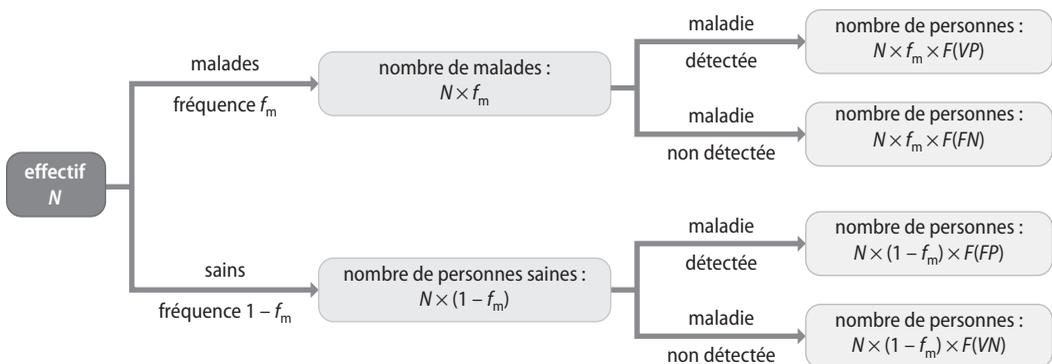
$$\frac{N \times f_m \times F(VP)}{N \times f_m \times F(VP) + N \times (1 - f_m) \times F(FP)} = \frac{f_m \times F(VP)}{f_m \times F(VP) + (1 - f_m) \times F(FP)}$$

Cette dernière expression est indépendante de N .

• Plus f_m est petit, plus $f_m \times F(VP)$ diminue au numérateur et plus $(1 - f_m) \times F(FP)$ augmente la valeur du dénominateur.

• Pour $f_m = \frac{1}{1\,000}$, le taux de détection des VP est environ de 33,1 % et de 83,3 % lorsque $f_m = \frac{1}{100}$.

• Lorsque la fréquence d'apparition de la maladie augmente, la fiabilité du test augmente. Cette évolution n'est pas linéaire.



► Exemple de correction des pistes de travail

1. Notre cerveau a l'habitude d'analyser des visages en vision convexe. Il conserve cette habitude pour interpréter l'image 4 qui correspond à l'envers du masque. Il privilégie l'hypothèse que l'envers du masque est aussi un visage.

2. Le capteur de distance optique indique à l'IA que le faux nez de la figure 4 est plus éloigné que le nez de la figure 1. L'IA interprétera donc la figure 4 en vision concave et la figure 1 en vision convexe.

3. La fréquence de vrais positifs est :

$F(VP) = \frac{990}{992} \approx 99,8 \%$

Malgré cette fréquence élevée, la fréquence faible d'apparition de la maladie dans la population $\left(\frac{1}{10\,000}\right)$ conduit à un résultat non intuitif. Le

pourcentage de patients réellement malades quand le test est positif n'est que de 4,7 % !

CORRECTION DES EXERCICES

► Vérifier ses connaissances

1 Question à réponse unique

A-1 : la proposition 2 n'est pas une bonne réponse car c'est la fonction d'un appareil photo numérique, ou d'une carte son, pas d'un ordinateur ; la proposition 3 n'est pas une bonne réponse car certains ordinateurs ne sont pas programmables par l'utilisateur, comme par exemple ceux embarqués dans les cartes d'anniversaires, qui jouent un air de musique que l'on ne peut pas changer ; la proposition 4 n'est pas une bonne réponse car le processeur, qui traite les données, est un composant obligatoire des ordinateurs.

B-4 : la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car les programmes informatiques sont des données informatiques particulières ; la proposition 2 n'est pas une bonne réponse car un programme informatique ne comporte pas forcément de bug, et s'il en contient, il faut les corriger ; la proposition 3 n'est pas une bonne réponse car l'intelligence artificielle repose sur des programmes informatiques mais ces deux notions ne sont pas équivalentes.

C-2 : la proposition 1 n'est pas une bonne réponse car on peut utiliser des ordinateurs pour soutenir un apprentissage, mais ce n'est pas ce que l'on entend par apprentissage machine ; la proposition 3 n'est pas une bonne réponse car l'intelligence artificielle repose obligatoirement sur le fonctionnement d'ordinateurs ; la proposition 4 n'est pas une bonne réponse car les prédictions réalisées en utilisant l'apprentissage machine sont hélas souvent biaisées.

2 Restituer les notions essentielles

a. Un ordinateur est un système capable de traiter de l'information selon un programme écrit dans un langage informatique. Au minimum, un ordinateur comporte un processeur permettant le traitement des données et une mémoire vive permettant leur stockage.

b. Un disque dur peut stocker des données du type images, vidéos, textes ou encore des programmes informatiques.

c. La reconnaissance faciale (des visages) des caméras de sécurité que l'on trouve de plus en plus dans les rues des grandes métropoles repose sur l'intelligence artificielle.

d. Un fichier exécutable se termine généralement par l'extension .exe sur Windows, et par l'extension .app sur Mac.

3 Vrai ou faux ?

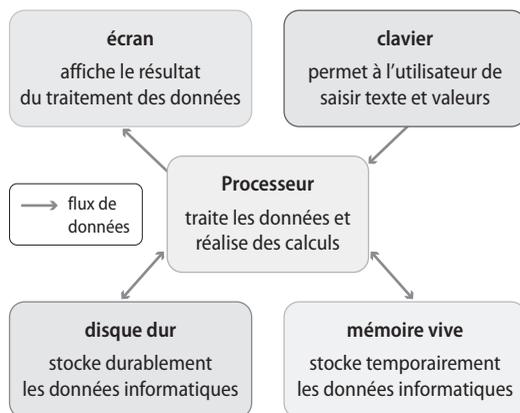
a. Faux. Une machine à tisser n'a pas de mémoire vive (dans laquelle un processeur pourrait écrire) et n'est donc pas un ordinateur.

b. Vrai.

c. Faux. Tous les ordinateurs comportent une mémoire vive, mais tous ne sont pas programmables par l'utilisateur.

d. Vrai.

4 Compléter un schéma



5 Retour sur les problématiques

• Qu'est-ce qu'une donnée informatique et comment un ordinateur la traite-t-il ?

Les données informatiques sont de natures très diverses : texte, vidéo, tableau de valeurs, photographie ou programme informatique, par exemple.

Ces données sont toujours dans un format numérique, c'est-à-dire constituées d'une série de valeurs numériques (ce qui nécessite parfois une étape de numérisation), de façon à pouvoir être manipulées et traitées par l'ordinateur, et en particulier par son processeur.

Le processeur est un composant présent dans tout ordinateur ; il a pour fonction de traiter les données informatiques suivant les instructions contenues dans un programme.

• Qu'est-ce qu'une intelligence artificielle ?

Une Intelligence Artificielle (IA) est un programme informatique qui cherche à simuler l'intelligence humaine. L'IA réalise des tâches que l'Homme accomplit en utilisant ses capacités de réflexion.

L'IA adapte ses prises de décision en fonction des informations qu'on lui donne (position de pièces sur un échiquier, mesures physiques pour une voiture autonome, tri d'images...) et est capable de prendre des initiatives.

Le calcul de prévision de résultats s'appuie entre autres sur la méthode de régression linéaire et l'inférence bayésienne.

Lorsque l'évolution d'un système semble se faire de manière linéaire, la méthode de régression calcule l'équation d'une droite de tendance qui permet alors d'anticiper un résultat comme par exemple le chiffre d'affaires d'une entreprise.

La méthode d'inférence bayésienne est une méthode de calculs de probabilités de causes à partir des probabilités de leurs effets couramment utilisées dans des filtres anti-spam et des analyses d'anomalies (domaine médical ou industriel).

Le manque de qualité des données induit un biais statistique qui peut fausser les résultats prévisionnels. Remplacer des êtres humains par des machines pose des problèmes éthiques dans de nombreux domaines (santé, justice, robots autonomes, etc.).

p. 280 ■

Exercice similaire

7 Évolution du jeu d'Alicia

On peut écrire le programme suivant :

```
1 from random import randint # Importation de la fonction randint du module random
2 N= randint(1,100) # Génération d'un nombre entier aléatoire entre 1 et 100
3 N1 = int(input(«Nombre entier entre 1 et 100 ?»)) # Saisie du nombre N1 par l'utilisateur
4 NombreEssai=1 # Initialisation du nombre d'essai à 1
5 while N1 != N : # Début de la boucle non bornée Tant que
6     if N1 <N : # Si N1 < N alors
7         print(«Nombre trop petit !») # Affichage de «Nombre trop petit !»
8         N1 = int(input(«Nombre ?»)) # Nouvelle saisie du nombre N1
9         NombreEssai = NombreEssai + 1 # Ajout de 1 au nombre d'essais
10    else : # Sinon
11        print(«Nombre trop grand !») # Affichage de «Nombre trop grand !»
12        N1 = int(input(«Nombre ?»)) # Nouvelle saisie du nombre N1
13        NombreEssai = NombreEssai + 1 # Ajout de 1 au nombre d'essais
14 print(«Vous avez trouvé en »,NombreEssai,» essai(s)») # Affichage des résultats
15 print(«Le nombre était »,N)
```

p. 281 ■

S'entraîner

On indique en italique quelques éléments de réflexion destinés à l'enseignant-e.

8 Repérer des erreurs dans un programme

1. Il manque la ponctuation : à la fin de la définition de la fonction « convertit_kelvin »
defconvertit_kelvin(tempCelsius):

Il manque une fermeture de parenthèses dans la ligne 2 (*toujours vérifier qu'il y a autant de parenthèses ouvertes et fermées*).

tempCelsius=float(input(«T (en °C) :»))

Il y a un signe égal en trop dans la ligne 5 (*le simple signe égal = est une affectation de valeur, alors que le double signe égal == est une comparaison*).

tempKelvin=tempCelsius + 273.15

Il faut utiliser un point et non une virgule pour séparer la partie entière de la partie décimale à la ligne 7.

cste=0.0028977

Il faut fermer les guillemets à la ligne 13 (*toujours vérifier qu'il y a un nombre pair de guillemets dans une ligne*)

print(«λmax (en nm) :»)

2. Ce fichier, dont l'extension est .py, contient le code source du programme. Les instructions contenues dans le code source ne peuvent pas être directement exécutées par le processeur, car Python est un langage « interprété ».

Sous Windows, seuls les fichiers se terminant par .exe peuvent être directement exécutés.

9 Conduite sans chauffeur

1. Les quatre capteurs du véhicule et leur rôle sont :

- le lidar : constitution d'un modèle 3D de l'environnement en temps réel ;
- le radar : estimation de la distance et de la vitesse des autres véhicules ;
- les caméras : observation en 2D de l'environnement (détection individus et véhicules) ;
- le GPS : positionnement du véhicule autonome dans son environnement.

L'IA détermine en temps réel une représentation de son environnement grâce aux informations recueillies par ces capteurs.

2. Des capteurs de pression dans les sièges indiquent à l'IA si des personnes sont assises. L'IA peut ainsi compter le nombre de passagers.

3. a. Pour protéger la vie des passagers, l'IA ne va pas freiner de manière brusque et risque de blesser l'animal. En situation de conduite autonome, l'entreprise qui a développé le programme de l'IA est responsable des éventuels dommages causés lors d'une collision.

Proposition d'algorithme : Si une collision ne peut être évitée avec un animal alors privilégier la protection des passagers.

b. Effectuer un choix de vie ou de mort entre des êtres humains est impossible. Le véhicule doit s'immobiliser le plus rapidement possible en déclenchant un freinage d'urgence et en activant par exemple des protections comme les airbags pour protéger les passagers.

Proposition d'algorithme : Si une collision ne peut être évitée avec des êtres humains alors déclencher un freinage d'urgence et activer les protections internes du véhicule.

10 Utiliser l'ADN pour stocker des données informatiques

1. Si on compte les espaces les séparant, chaque mot occupera en moyenne 6 octets en mémoire.

• Calcul de la taille occupée par Wikipedia en ASCII : $W = 3,5 \times 10^9 \times 6 = 2,1 \times 10^{10}$ octets.

L'intégralité du texte de Wikipedia, codé en ASCII, occuperait :

$3\ 500\ 000\ 000 \times 6$ octets, soit $2,1 \times 10^{10}$ octets.

• Calcul de la quantité de données que peut stocker 1 g d'ADN :

Sachant qu'un gramme peut en théorie stocker (environ) 200 pétaoctets, soit 2×10^{17} octets, la masse d'ADN nécessaire pour stocker Wikipedia serait :

$$m = \frac{1,75 \times 10^{10}}{2 \times 10^{17}} = 1,05 \times 10^{-7} \text{ g.}$$

Il suffirait, en théorie, de $1,05 \times 10^{-7}$ g d'ADN pour stocker l'intégralité de Wikipedia.

2. Une clé USB d'une capacité de 256 Go et pesant 10 g permet de stocker environ 25 Go par gramme de support, contre 200 Po (pétaoctets) par gramme pour l'ADN. En termes de capacité de stockage, l'ADN est considérablement plus performant.

Cependant, si une clé USB permet de lire 300 Mo par seconde, la vitesse de « lecture » des données sur l'ADN est bien plus lente : 2 Mo pour une journée entière, soit environ 2,5 octets par seconde.

L'ADN permet donc de stocker des quantités considérables de données sur le long terme, mais ce n'est pas un support adapté pour une lecture rapide des données.

11 Un filtre anti SPAM bayésien

1. Tableau de contingence :

« Urgent »	SPAM	Sain
DéTECTÉ	$\frac{6}{8}$	$\frac{2}{8}$
Non détecté	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

2. Pour effectuer le calcul, on peut s'aider de la formule du cours à la page 277 ou de la partie 3 de « L'essentiel en images » à la page 278.

$$f_m = 0,1 ; F(VP) = \frac{6}{8} \text{ et } F(FP) = \frac{2}{8}$$

$$\frac{0,1 \times \frac{6}{8}}{0,1 \times \frac{6}{8} + (1-0,1) \times \frac{2}{8}} \approx 0,25$$

3. Les données sont insuffisantes et ne reflètent que le choix de sélection d'un individu.

4.

« Urgent »	SPAM	Sain
DéTECTÉ	$\frac{980}{990}$	$\frac{10}{990}$
Non détecté	$\frac{6}{10}$	$\frac{4}{10}$

Pour effectuer le calcul, on peut s'aider de la formule du cours à la page 277 ou de la partie 3 de « L'essentiel en images » à la page 278.

$$f_m = 0,1 ; F(VP) = \frac{980}{990} \text{ et } F(FP) = \frac{10}{990}.$$

$$\frac{0,1 \times \frac{980}{990}}{0,1 \times \frac{980}{990} + (1-0,1) \times \frac{10}{990}} \approx 0,92.$$

$$0,1 \times \frac{980}{990} + (1-0,1) \times \frac{10}{990}$$

Le taux de détection de 92 % est maintenant supérieur à celui initial de 25 %.

5. Cinq mots clés (Urgent, cliquer, lien, gain, créé pour vous) sont identifiés dans le message. On calcule une moyenne des taux de détection.

$$\frac{92+78+70+90+83}{5} = 82,6.$$

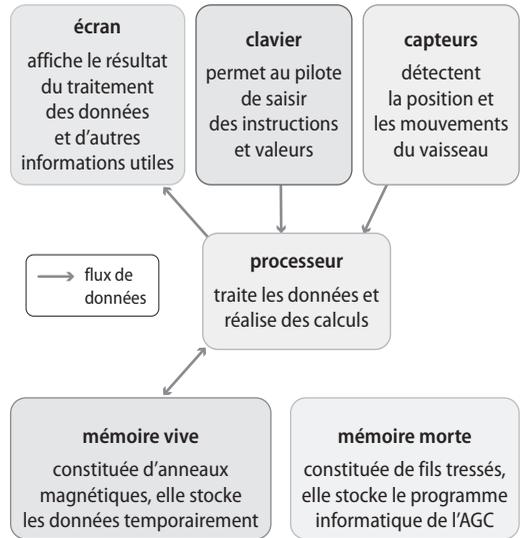
6. $82,6 > 80$, donc le message est classé comme un SPAM.

12 **Prépa BAC** **Des ordinateurs pour aller sur la Lune**

1. Les deux composants d'un ordinateur sont le processeur et la mémoire vive.

2. L'AGC dispose d'une mémoire vive dont la capacité est de 32 768 bits. Sachant qu'un octet comporte 8 bits, la capacité de la mémoire vive (RAM) de l'AGC est de 4 096 octets (4 kilooctets).

3.



4. Encodé en ASCII, le discours du président Kennedy occuperait 12 045 octets. La mémoire vive de l'AGC, n'en comportant que 4 096, n'aurait pas pu le stocker.

Un fichier vidéo a une taille dont l'ordre de grandeur est le gigaoctet (milliard d'octets). La mémoire vive de l'AGC n'aurait bien entendu pas pu le stocker.

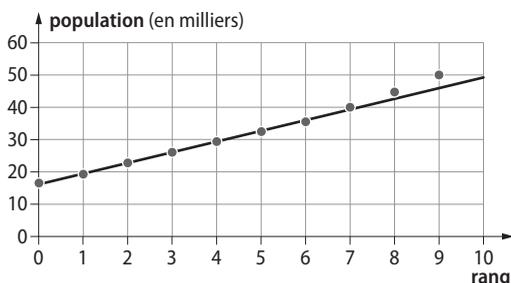
Vers l'évaluation commune

Manuel p. 284

CORRECTION DES EXERCICES

2 Étude de la population d'une ville

1. Nuage de points.



2. a. On calcule dans un tableau les variations absolues d'un palier à l'autre de 2006 à 2015.

Année	2006	2007	2008	2009	2010
Rang n	0	1	2	3	4
Population	16,4	19,5	22,8	25,9	29,4
Variation absolue		3,1	3,3	3,1	3,5

Année	2011	2012	2013	2014	2015
Rang n	5	6	7	8	9
Population	32,4	35,5	40	44,7	50
Variation absolue	3	3,1	4,5	4,7	5,3

b. La variation absolue est quasiment constante de 2006 à 2012. On peut donc considérer que la croissance de la population a été linéaire sur cette période.

c. On obtient une équation de la droite d'ajustement des points du nuage, pour un rang d'année compris entre 0 et 7, avec une calculatrice : $y = 3,30x + 16,17$, en arrondissant les coefficients de l'équation à 0,01 près.

3. a.

Année	2012	2013	2014	2015
Rang n	6	7	8	9
Population	35,5	40	44,7	50
Taux de variation		12,7 %	11,7 %	11,9 %

On remarque que le taux de variation est sensiblement constant sur cette période, alors que la variation absolue ne l'est pas. On peut donc utiliser un modèle exponentiel sur cette période.

b. *Errata* : Dans certains manuels, on peut lire « $u(4) = 50$ ». Il faut lire « $u(3) = 50$ ».

Si on note q la raison de la suite, $u(n) = u(0) \times q^n$, soit $u(n) = 35,5 \times q^n$.

Puisque $u(3) = 50$, alors $35,5 \times q^3 = 50$, soit $q^3 = 1,408$ et ainsi $q = 1,408^{\frac{1}{3}}$.

Avec la calculatrice, on obtient $1,408^{\frac{1}{3}} \approx 1,12$.

Ainsi, pour tout entier naturel n , $u(n) = 35,5 \times 1,12^n$.

c. La population double lorsque $u(n) \geq 2 u(0)$, ce qui donne : $1,12^n \geq 2$.

Un tableau de valeurs de la suite obtenu avec une calculatrice fournit la valeur de n cherchée : $n = 7$.

X	Y ₁
1	1.12
2	1.2544
3	1.4049
4	1.5735
5	1.7623
6	1.9738
7	2.2107
8	2.476

Le temps de doublement de cette population est de 7 ans, à partir de 2012. C'est donc en 2019 qu'elle va doubler.

d. Puisque $2025 = 2012 + 13$, on doit calculer $u(13)$. $u(13) = 35,5 \times 1,12^{13}$, soit $u(13) \approx 154,90$.

On estime la population en 2025 selon ce modèle à 154 900 habitants.

4. a.

	Test positif	Test négatif	Total
Malades	2 400	100	2 500
Non malades	950	46 550	47 500
Total	3 350	46 650	50 000

b. D'après le tableau de contingence, il y a 2 400 personnes malades ayant un test positif.

c. Il y a 46 550 personnes qui ont un test négatif, et parmi elles, il y a 100 personnes malades. Donc la probabilité qu'une personne soit malade alors que son test est négatif est $\frac{100}{46\,550}$, soit environ 0,002 (ou 0,2 %).

d. Il y a 3 350 personnes qui ont un test positif, et parmi elles, il y a 2 400 personnes malades. Donc la probabilité qu'une personne soit malade alors que son test est positif est $\frac{2\,400}{3\,350}$, soit environ 0,716 (ou 71,6 %).

3 Les fourmis arboricoles

► Partie 1. Évaluer la biodiversité des fourmis d'une forêt

1. La richesse spécifique d'un écosystème correspond au nombre d'espèces différentes qu'il contient.

2. Sur le graphique du document 2, on constate que le nombre total d'espèces identifiées au bout de 738 échantillonnages est d'environ 130. On constate également que ce nombre augmente de plus en plus lentement au fur et à mesure que l'on collecte des échantillons (on découvre de moins en moins de nouvelles espèces dans les derniers échantillons). On peut donc estimer qu'il y a au moins 130 espèces différentes de fourmis dans cette forêt, mais guère plus (moins de 150 vraisemblablement).

3. Pour augmenter la précision de cette estimation, les chercheurs doivent réaliser davantage d'échantillonnages. Plus le nombre d'échantillons étudiés sera élevé, plus le nombre d'espèces différentes identifiées se rapprochera du nombre d'espèces différentes réellement présentes dans la forêt. Les chercheurs peuvent également travailler sur des échantillons plus grands.

4. Pour estimer le nombre de fourmis par la méthode de capture-marquage-recapture, on utilise la formule suivante : $N = n \times \frac{m_0}{m}$, où n est l'effectif de l'échantillon, m_0 le nombre d'individus marqués

initialement, et m le nombre d'individus marqués dans l'échantillon recapturé.

$$N = 200 \times \frac{500}{40} = 2\,500.$$

On peut estimer qu'il y a 2 500 fourmis dans la population étudiée.

► Partie 2. Couronne forestière et richesse spécifique

1. Si on se fie à la droite de tendance, on constate que plus la surface de la base de la couronne est grande, plus la richesse spécifique est élevée. Il existe donc bien une relation entre la taille de la couronne d'un arbre dépourvu de lianes et la richesse spécifique de la population de fourmis qu'il héberge. Un arbre dépourvu de lianes, mais doté d'une large couronne hébergera un plus grand nombre d'espèces de fourmis qu'un arbre dépourvu de lianes et présentant une petite couronne.

2. Les chercheurs ont émis l'hypothèse suivante : dans un arbre pourvu de lianes, la richesse spécifique est uniquement liée à la densité des lianes. Dans le document 5, on constate que les points sont distribués aléatoirement sur le graphique, sans qu'aucune tendance ne se dégage. On en déduit qu'il n'y a pas de relation entre la surface de la base de la couronne et la richesse spécifique dans un arbre pourvu de lianes.

Dans le document 6, par contre, on constate que plus la densité des lianes est importante, plus la richesse spécifique est élevée. Pour un arbre sans lianes, la richesse spécifique est en moyenne de 8,25 (intervalle de confiance compris entre 7,75 et 8,75 environ) alors que dans un arbre comportant plus de 10 lianes, cette richesse atteint 10,25 (entre 9,75 et 10,75 environ). Au-delà, elle n'augmente plus. Même en prenant en compte l'intervalle de confiance, on peut donc affirmer qu'il existe bien une relation entre la densité des lianes et la richesse spécifique.

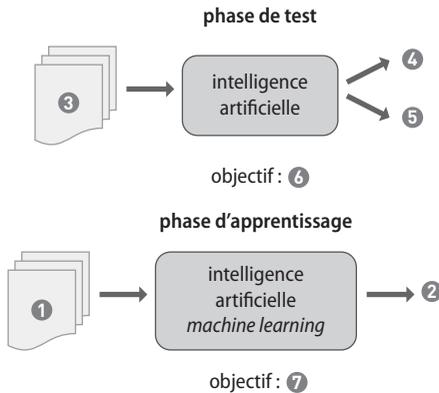
L'hypothèse des chercheurs est donc validée : dans un arbre dépourvu de lianes, la richesse spécifique augmente avec la densité des lianes indépendamment de la taille de la couronne.

3. Les forêts tropicales présentent une très grande richesse spécifique. Beaucoup d'espèces y sont endémiques, c'est-à-dire n'existent que dans ces écosystèmes. Hélas, comme le dit le document, la déforestation des régions intertropicales s'est considérablement accrue, faisant disparaître des écosystèmes présentant une grande biodiversité,

et par la même un grand nombre d'espèces dont certaines n'auront jamais pu être étudiées.

4 E-réputation sur les réseaux sociaux

► Partie 1. Étude générale



► Partie 2. Étude des données pour l'apprentissage

1. a. La taille maximale de la base de données est définie comme le produit du nombre de tweets contenus dans la base de données (ici, 10 000 000) par le nombre de caractères (ici, le maximum est de 280 caractères au maximum) et par le nombre d'octets permettant de coder chaque caractère (ici, 1 octet par caractère). Soit une taille maximale de : $10\,000\,000 \times 280 \times 1 = 2,8\text{ Go}$, soit 2 800 Mo.

b. Une clé USB ou un disque dur (externe) sont des outils de stockage adaptés.

2. L'exécution de traitement(tweet,motsliasons) renvoie la liste ['enfin', 'gretathunberg', 'reste', 'suède', 'qu'elle', 'reprenne', 'chemin', 'l'école', 'comme', 'tous', 'enfants', 'son', 'âge'].

► Partie 3. Étude des résultats de l'apprentissage

1. Le nombre total de tweets utilisés correspond à la somme des nombres présents sur le tableau de contingence (matrice de confusion). Par conséquent, dans notre étude, celui-ci est de : $2\,872 + 1\,448 + 1\,028 + 4\,574 = 9\,922$.

Cette valeur confirme bien l'affirmation que près de 10 000 tweets ont été utilisés pour l'apprentissage.

$$2. \bullet SE = \frac{VP}{VP + FN} = \frac{4\,574}{4\,574 + 1\,028} = 0,8165$$

$$\text{et } SP = \frac{VN}{VN + FP} = \frac{2\,872}{2\,872 + 1\,448} = 0,6648.$$

Soit une sensibilité de 81,65 % et une spécificité de 66,48 %.

• La classification mise en œuvre ici n'est pas très performante, car les taux de reconnaissance d'un tweet

positif ou négatif sont faibles. On note aussi que le taux de reconnaissance des tweets négatifs est très faible.

3. L'apprentissage est réalisé à partir de données contenant 70 % de tweets positifs et 30 % de tweets négatifs. Du fait de la faible proportion de tweets négatifs, la reconnaissance de ceux-ci sera probablement moins performante. Cette affirmation est bien vérifiée par le résultat de la question précédente pour laquelle on a trouvé une spécificité de 66 %. Pour éviter ce biais, il serait intéressant de mettre en place une base de données contenant autant de tweets étiquetés positifs que de tweets étiquetés négatifs.

4. *A priori*, il faudrait dans la base de données plutôt 10 000 000 de tweets, mais il faudra accepter une durée d'apprentissage très importante et un gain de classification faible par rapport à un apprentissage à partir de 1 000 000 de tweets.

► Partie 4. Synthèse

L'étude porte sur la classification automatique de tweets afin d'obtenir l'e-réputation d'une personne, d'une entreprise, d'une association, en utilisant l'intelligence artificielle, et sur l'analyse des performances de la classification. L'étude est menée en trois parties.

- La première s'intéresse au principe de l'intelligence artificielle afin de préciser les entrées et sorties des phases d'apprentissage et de tests.

- La seconde partie s'intéresse à un programme informatique qui permet de sélectionner les mots pertinents dans un tweet.

- Enfin, la dernière partie s'intéresse à l'analyse des performances de classification des tweets. Cette étude a permis de mettre en évidence :

- l'importance du nombre de tweets utilisés pour l'apprentissage, qui doit être le plus grand possible malgré une durée de traitement de la phase d'apprentissage importante ;

- l'importance de bénéficier de données d'apprentissage sans biais (nombre de tweets étiquetés positifs identique à celui de tweets étiquetés négatifs) pour obtenir une bonne classification.

5 Évolution humaine et acquisition de la bipédie

1. Le hasard des mutations peut être à l'origine de nouveaux caractères qui, s'ils apparaissent comme étant favorables à la survie et/ou à la reproduction des individus dans un environnement donné, vont être conservés par la sélection naturelle. Le caractère qui disparaît devient un caractère ancestral et le nouveau, un caractère dérivé.

Ici, tous les caractères dérivés qui nous intéressent sont ceux qui vont permettre une course de fond plus efficace :

- faible pilosité et glandes sudoripares, pour une dissipation rapide de la chaleur produite lors de la course ;
- jambes plus longues que les bras et longs tendons riches en collagène qui rendent mécaniquement la course plus efficace ;
- gros orteil accolé aux autres doigts de pied qui sont réduits ;
- grande surface d'insertion des muscles fessiers et présence du ligament nuchal qui permettent une stabilisation du corps.

Remarque : une liste exhaustive n'est pas ici attendue mais un ou deux exemples pourront suffire parmi ceux qui sont cités.

Être capable de courir avec endurance a pu se révéler avantageux pour échapper aux prédateurs ou pour la chasse permettant ainsi aux individus de mieux survivre et donc se reproduire davantage transmettant ainsi ces caractéristiques aux générations suivantes.

2. L'apparition des poils chez les mammifères est une évolution qui permet à ces animaux homéothermes de maintenir plus facilement la température interne de leur corps en diminuant les

déperditions de chaleur. La disparition des poils chez l'Homme est donc une régression évolutive tout en étant une adaptation puisque cela permet une dissipation plus efficace de la chaleur suite à une course intense. On peut aussi penser à la taille des doigts de pieds (en régression), mais qui permet une meilleure stabilisation du pied lors de la course ou encore à la perte du « pouce » opposable du pied qui joue désormais un rôle de point d'appui pour la marche.

3. Le critère essentiel de l'appartenance à la lignée humaine est la bipédie. Certaines données anatomiques de l'australopithèque montrent une adaptation à la bipédie : un bassin court et large bien visible sur le squelette du document, un rapport de la taille membre supérieur/membre inférieur voisin de 1 et donc intermédiaire entre l'Homme et le chimpanzé, une insertion des muscles fessiers, favorable à la bipédie, plus large que chez le chimpanzé.

4. Le positionnement des membres inférieurs proches de celui du chimpanzé, la forme du pied avec le pouce écarté, l'absence de ligament nuchal, la surface d'insertion des muscles du fessier qui est moyenne, une pilosité encore importante (reconstitution) sont des caractères montrant que l'Australopithèque n'est pas apte à la course.