MODULE SUR LE CLIMAT

Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique

MANUEL SCOLAIRE

MODULE SUR LE CLIMAT

Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique

MANUEL SCOLAIRE

MODULE SUR LE CLIMAT

Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique

MANUEL SCOLAIRE

Les auteurs :
Vladimir Berdin (auteur principal, Sections 1.1.-1.4, 2.6, 2.8 et 3.5)
Yulia Dobrolyubova (révision complète, Sections 2.7, 2.9 et 2.10)
Ekaterina Gracheva (Sections 3.1, 3.2 et 3.4)
D.Sc. Pavel Konstantinov (Sections 1.1, 2.1, 2.4, 2.5, 2.9)
D.Sc. Natalia Ryzhova (Section 2.2)
D.Sc. Katia Simeonova (mises à jour de la version 2024)
D.Sc. Elena Smirnova (révision complète, Sections 3.2, 3.3, 3.4)
D.Sc. Dmitry Zamolodchikov (Section 2.3)

Chefs de projet :
Natalia Olofinskaya
Antonina Khovanskaya
Elena Surovikina
D.Sc.Sergey Tambiev
Petra Valastinova

Révision technique :
Terence John Carrington
Armine Poghosyan

Réviseurs pédagogiques :
Lyubov Kolotilina
Elena Malts
D.Sc. Elena Smirnova

Editeur version 2024
Bharati Sadasivam

Conception et présentation version 2024 :
Natan Giuliano, Alvard Ohanjanyan

Remerciements :
L'équipe chargée du projet souhaite remercier l'ensemble des conseillers et consultants scientifiques pour leur contribution à la préparation de la trousse à outils d'apprentissage interactive du Module sur le Climat, et particulièrement : Alexey Kokorin (WWF) pour ses précieux conseils lors de la préparation des sections « Le changement climatique » et « Les effets du changement climatique sur la région arctique » ; Yulia Kalinicheva (WWF) pour son aide lors de la préparation de la carte murale et de l'affiche ; le PNUD en Arménie pour la préparation de l'affiche sur l'adaptation au climat ; Alexey Soldatov (BSH Home Appliances LLC) et Olga Pegova (WWF) pour leur aide lors de la préparation des supports sur le thème « Efficacité énergétique et économie d'énergie » ;

Le manuel scolaire du Module sur le Climat fait partie d'une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique destinée aux élèves du secondaires et du primaire et à leurs professeurs de sciences naturelles et d'études environnementales. Cette trousse à outils a été élaborée par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), avec le soutien financier fourni pour les différentes phases du Programme du Module sur le climat fourni par le Fonds pour l'environnement mondial, le Gouvernement de la Fédération de Russie et la société Coca-Cola. Le Module sur le Climat poursuit la série de trousses à outils environnementales destinées aux élèves, composée également du Module sur la Mer Noire et Petit Coffre au Trésor du Baïkal.

Module sur le Climat : Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique. / V. Berdin, E. Gracheva, Y. Dobrolyubova et al. – Programme des Nations Unies pour le développement, 2024

UDC 373.3 (5) : 551,583
BBK : 74.26 :26.237 K49
ISBN 978-5-9902971-2-8

© Programme des Nations Unies pour le développement. Tous droits réservés. Cette publication peut être reproduite à des fins éducatives non commerciales sans le consentement écrit du titulaire du droit d'auteur à condition que la source soit correctement citée.

Les désignations utilisées et la présentation des éléments sur les cartes n'impliquent l'expression d'aucune opinion quelle qu'elle soit de la part du Secrétariat des Nations Unies ou du PNUD concernant le statut juridique de tout pays, territoire, ville ou région ou de ses autorités, ou concernant la délimitation de ses frontières ou limites.

À propos du projet de MODULE SUR LE CLIMAT

Le changement climatique a été reconnu universellement comme l'un des problèmes mondiaux prioritaires à l'heure actuelle. Le problème est mondial car les effets du changement climatique se font ressentir dans tous les pays et toutes les régions du monde, et car chacun d'entre nous, à des degrés divers, est responsable des changements qui se produisent sur notre planète. Nous sommes les consommateurs ultimes de biens et services qui nécessitent des ressources et de l'énergie, à savoir des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel). La production et la consommation de combustibles fossiles provoque des émissions de gaz à effet de serre (GES), ce qui augmente leur concentration dans l'atmosphère et l'effet de serre associé ainsi que la température globale de l'air. La production de ciment et de métaux, ainsi que d'autres activités humaines sur terre, comme les activités agricoles et la gestion forestière, augmentent également les émissions de GES dans l'atmosphère. Il s'agit de l'empreinte carbone que nous laissons sur Terre.

L'impératif du changement climatique exige que nous acquérions toutes les connaissances et tous les outils dont nous avons besoin pour protéger notre environnement et réduire notre empreinte carbone. Il est primordial d'inculquer ces connaissances et habitudes dès le plus jeune âge, afin que chacun soit en mesure de comprendre, une fois sa scolarité terminée, combien il est important de prendre soin de notre environnement naturel et de ses ressources.

Dans cette optique, le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), avec le soutien du Fonds pour l'environnement mondial (FEM), du Gouvernement de la Fédération de Russie et de la société Coca-Cola, a élaboré le Module sur le Climat : une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique à destination des étudiants. Il a pour objectif de fournir aux étudiants des faits essentiels sur les questions liées au changement climatique mondial d'une manière intéressante et divertissante, et aux enseignants des recommandations sur l'utilisation de la boîte à outils dans le programme scolaire.

« À tous ceux qui travaillent, marchent et défendent une véritable action climatique, je veux que vous sachiez que vous êtes du bon côté de l'histoire et que je suis avec vous. »

António Guterres
Secrétaire général des Nations Unies
19 Septembre 2023

Le Module sur le Climat se compose des éléments suivants :

- un manuel illustré destiné aux étudiants, comportant du matériel pédagogique et un ensemble de questions et d'exercices individuels et collectifs, ainsi que des directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils en cours en fonction des différentes tranches d'âge (qui feront l'objet d'un chapitre du manuel scolaire et d'un supplément séparé)
- un Quiz sur le Climat, un ensemble de cartes de jeu
- une carte murale illustrant les conséquences possibles du changement climatique sur la nature et l'humanité dans diverses régions d'ici la fin du XXIe siècle
- une affiche contenant des recommandations sur la manière de résister et de s'adapter aux impacts du changement climatique difficiles à atténuer
- une affiche avec des conseils
- climate-box.com - un site Web fournissant tous les supports inclus dans la trousse à outils.

Ce Module sur le Climat a été conçu spécialement à l'intention des étudiants. Le manuel revêt la forme d'une encyclopédie illustrée sur le thème du climat, exposant des problèmes majeurs et parfois complexes de manière ludique. Les lecteurs y apprennent comment le climat de la Terre a évolué depuis les premières ères géologiques, quels sont les changements climatiques observés aujourd'hui, comment ces changements affectent la nature et l'humanité, si nous pouvons nous adapter aux conséquences inévitables de ce changement, comment éviter les conséquences les plus dangereuses de ce réchauffement climatique, et quelles sont mesures ayant déjà été prises dans les différentes régions du monde. Une section séparée du manuel explique au lecteur comment réduire son empreinte carbone personnelle.

Le manuel scolaire et les autres supports compris dans le Module sur le Climat ont été conçus de manière à être accessibles aux lecteurs les plus jeunes en toute autonomie. Certains thèmes s'adressent principalement aux jeunes enfants, et d'autres aux élèves du secondaire. Certains lecteurs trouveront l'ensemble du manuel intéressant, tandis que d'autres ne seront intéressés que par des faits, des illustrations et des idées d'expériences précis. Chacun trouvera quelque chose de nouveau ou d'intéressant dans le Module sur le Climat.

La réussite de la phase de pilotage du Module sur le Climat ainsi que l'appréciation des experts en changement climatique, des enseignants et des élèves ont suscité une volonté d'élaborer une mallette pédagogique véritablement internationale, unissant les enfants et les enseignants par-delà les frontières.

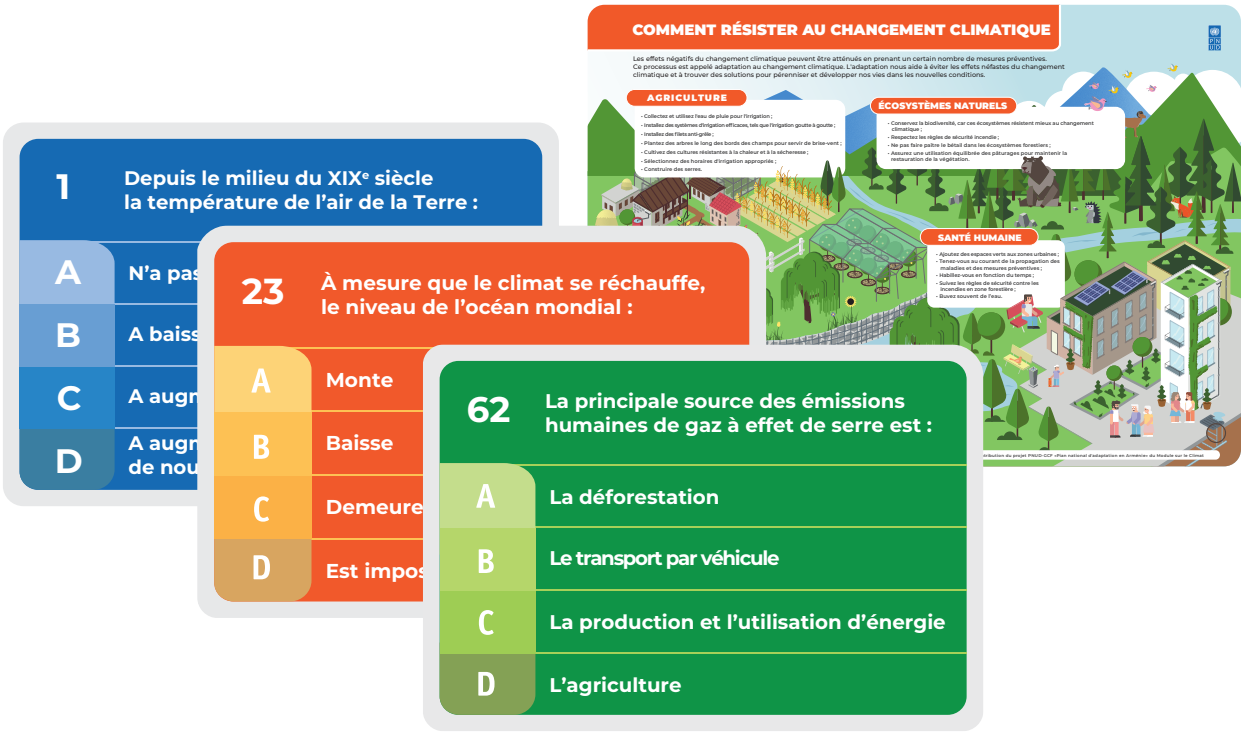
En 2019, le PNUD a entrepris de déployer le projet de Module sur le Climat à plus grande échelle, dans neuf pays d'Europe de l'Est, du Caucase et d'Asie centrale, et le nombre de nouveaux pays continue d'augmenter. Des versions numériques de la trousse à outils sont accessibles aux enfants dans différentes langues des nations Unies et dans les langues des pays qui participent au projet sur le site Internet **www.climate-box.com**.

Cette version française révisée 2024 de la boîte à outils du Module sur le climat contient les informations les plus récentes sur le changement climatique, notamment les principales conclusions du sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et des études de cas d'initiatives récentes sur l'atténuation et l'adaptation au changement climatique dans le monde entier. Il comprend également les commentaires et les recommandations reçus des enseignants et des experts des pays participants sur la base de leur expérience dans l'application du programme et de la boîte à outils du Module sur le climat.

Une grande équipe de rédacteurs a travaillé à l'élaboration du Module sur le Climat, notamment des experts reconnus en climatologie, géographie, biologie et économie, ainsi que des écrivains professionnels de livres pour enfants. Des enseignants expérimentés ont apporté une contribution inestimable au projet en aidant à élaborer des directives relatives à l'utilisation en classe de la trousse à outils par les enseignants.

Nous espérons que le Module sur le Climat continuera d'être une source d'informations sur le changement climatique à la fois utile et intéressante pour les élèves, et les aidera à apprendre comment protéger le milieu naturel.

En savoir plus sur le Module sur le climat à www.climate-box.com.



Avant-propos

Thomas Stocker

Professeur de physique du climat et de l'environnement, Université de Berne, Suisse

Coprésident du Groupe de travail I du GIEC, 2008 - 2015

2030, 2050, 2100... Ces années sont souvent mentionnées lorsque nous parlons du changement climatique, de ses effets et de la nécessité de s'adapter aux transformations inévitables qui se produiront dans le futur.

Ces dates semblent lointaines pour la plupart des personnes, et surtout pour les jeunes. Mais pour vous, la génération suivante ces points de repère sur l'axe du temps sont essentiels. Quelle sera ma profession en 2030 ? Où vivrai-je en 2050 ? Mes enfants pourront-ils mener une vie heureuse en 2100 ? Ces questions sont fondamentales pour les étudiants d'aujourd'hui, du primaire à l'université.

Notre génération a l'habitude d'obtenir des réponses à ces questions tournées vers l'avenir en s'analysant, en obtenant la meilleure éducation possible, en travaillant dur et en faisant preuve de créativité et d'inventivité. Cependant, le changement climatique induit par l'homme ne modifiera pas uniquement les conditions de vie sur Terre, notre seule demeure, mais influencera également de plus en plus de nos choix de vie, le bien-être de nos familles et celui de nos voisins, proches comme éloignés. Le changement climatique deviendra le facteur le plus déterminant de nos conditions de vie au cours des prochaines dècennies.

C'est la raison pour laquelle le Module sur le Climat arrive à point nommé. Nous avons besoin de savoir de quoi sera fait notre avenir, de comprendre comment nos décisions actuelles auront non seulement une incidence sur nos propres vies, mais également comment elles influenceront, de multiples façons et de manière complexe, celles de nos enfants et de nos petits-enfants. Les connaissances scientifiques relatives à l'influence de l'homme sur la Terre, sur son climat et sur l'ensemble de ses ressources doivent être enseignées dès le plus jeune âge afin de de développer la sensibilité à ces questions dès que possible.

L'instruction peut prendre diverses formes. Le Module sur le Climat propose une introduction fraîche et dynamique à ce sujet particulièrement complexe. En reprenant les données scientifiques les plus récentes, en les expliquant clairement, sous la forme de graphiques simples, de dessins et d'histoires, les élèves peuvent facilement assimiler les connaissances au moyen d'une variété de systèmes. Les Exercices contenus dans le Module sur le Climat permettent de rappeler, d'évaluer et d'ancrer ces connaissances.

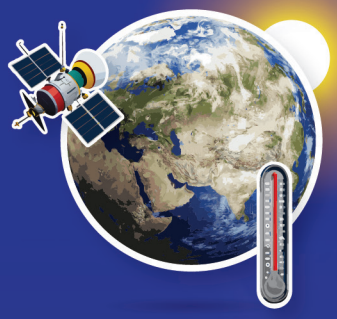
La mondialisation nous a apporté de nombreux avantages, mais nous ne sommes pas suffisamment équipés pour vivre, travailler et fonctionner dans un contexte de mondialisation. Notre cerveau s'entraîne depuis des millénaires à réagir et à s'adapter aux changements qui se produisent dans notre environnement immédiat. Cela est essentiel pour notre survie. Nos capteurs personnels ne vont pas au-delà de ce que nous voyons ou entendons. Cependant, nos actions, notamment la consommation d'énergie provenant de combustibles fossiles, et la dilapidation des réserves terrestres à travers la déforestation et bien d'autres activités, ont à ce jour des répercussions mondiales qui menacent notre survie à tous.

Notre kit de survie a donc sérieusement besoin d'être mis à jour. Cette mise à jour nous est offerte par la science qui nous permet de comprendre le changement climatique et nous donne la possibilité de déterminer les avenirs possibles en fonction de nos choix actuels.

Vivrons-nous dans un monde différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, un monde plus chaud avec un climat modifié, mais toujours un foyer dans lequel la plupart des habitants de la Terre sont capables de s'adapter et de vivre confortablement ? Ou allons-nous, en raison d'un changement climatique incontrôlé, connaître un monde fondamentalement différent, beaucoup plus chaud que tout ce à quoi les humains et les écosystèmes peuvent faire face, avec un niveau de la mer supérieur d'au moins 1 mètre aux niveaux actuels, de vastes étendues de zones côtières submergées et invivables, des glaciers décharnés et un environnement arctique irrémédiablement modifié ? Ce monde sera accompagné de phénomènes météorologiques extrêmes causant du tort aux personnes les plus vulnérables, et de nombreux écosystèmes qui auront cessé de remplir leurs fonctions. Selon les projections, cet autre monde devrait découler du maintien du « statu quo », expression relativement inappropriée et trompeuse laissant suggérer qu'en 2050 et 2100, les activités que nous connaissons aujourd'hui se poursuivront « comme si de rien n'était ». Tout citoyen avisé sait déjà que cela ne sera pas le cas dans ce contexte.

Le Module sur le climat permet aux étudiants de connaitre ces conséquences fatales du changement climatique grâce à la science et l'instruction, en aiguisant leur sensibilité aux conséquences de leurs actions. Je souhaite que grâce à ce matériel pédagogique innovant, accessible à tous les niveaux de l'éducation, nous inciterons la prochaine génération à ne pas perdre autant de temps que nous ne l'avons fait, et à prendre les bonnes décisions.

TABLE DES MATIÈRES



PARTIE 1

Le problème du changement climatique 11

1.1 Climat et temps — 15
1.2 Les types de climat et les zones climatiques — 18
1.3 Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé — 28
1.3.1 Les causes du changement climatique : en millions d'années — 30
1.3.2 Les causes du changement climatique : en dizaines de milliers d'années — 32
1.3.3 Les causes du changement climatique : en siècles — 35
1.4 Le changement climatique de nos — 40

PARTIE 2

Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains.

Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ? 51

2.1 Les effets du changement climatique sur **le temps** — 59
2.2 Les effets du changement climatique sur **les plantes et les animaux** — 72
2.3 Les effets du changement climatique sur **les forêts** — 93
2.4 Les effets du changement climatique sur **les ressources en eau** — 114
2.5 Les effets du changement climatique sur **l'agriculture** — 125
2.6 Les effets du changement climatique sur **les régions côtières** — 132
2.7 Les effets du changement climatique sur **les régions montagneuses** — 143
2.8 Les effets du changement climatique sur **la région arctique** — 159
2.9 Les effets du changement climatique sur **les villes et la santé** — 178
2.10 Les effets du changement climatique sur **les problèmes sociaux** — 192

PARTIE 3

Comment prévenir les changements climatiques dangereux ? 202

3.1 Les énergies « vertes » 206
- 3.1.1 Qu'est-ce que l'énergie ? 206
- 3.1.2 Les principales sources d'énergie 207
- 3.1.3 Les combustibles fossiles 209
- 3.1.4 L'énergie nucléaire 214
- 3.1.5 Les énergies renouvelables 217
- 3.1.6 Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie 235

3.2 Efficacité énergétique et économie d'énergie 241
- 3.2.1 Transports respectueux de l'environnement 246
- 3.2.2 Appareils électroménagers et appareils électriques 253
- 3.2.3 Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs 256
- 3.2.4 Villes vertes 262

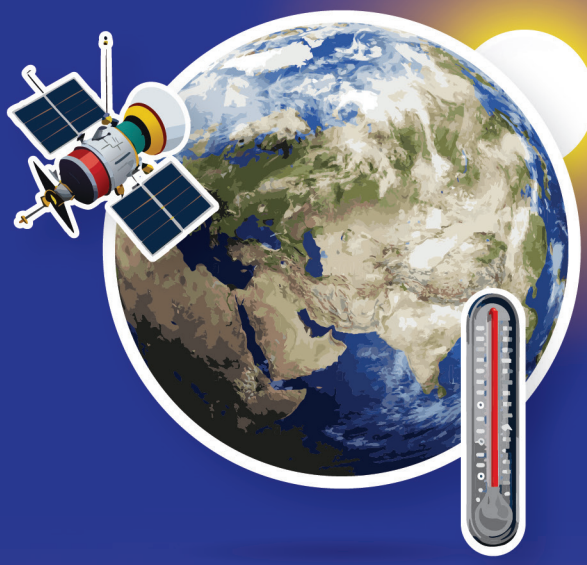
3.3 L'empreinte carbone et comment puis-je aider la planète en réduisant mon empreinte carbone 268

3.4 Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable et une approche qui implique l'ensemble de la société dans la lutte contre ses effets 283

PARTIE 4

Directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils du Module sur le Climat dans les établissements scolaires 294

Liste des illustrations 322



1

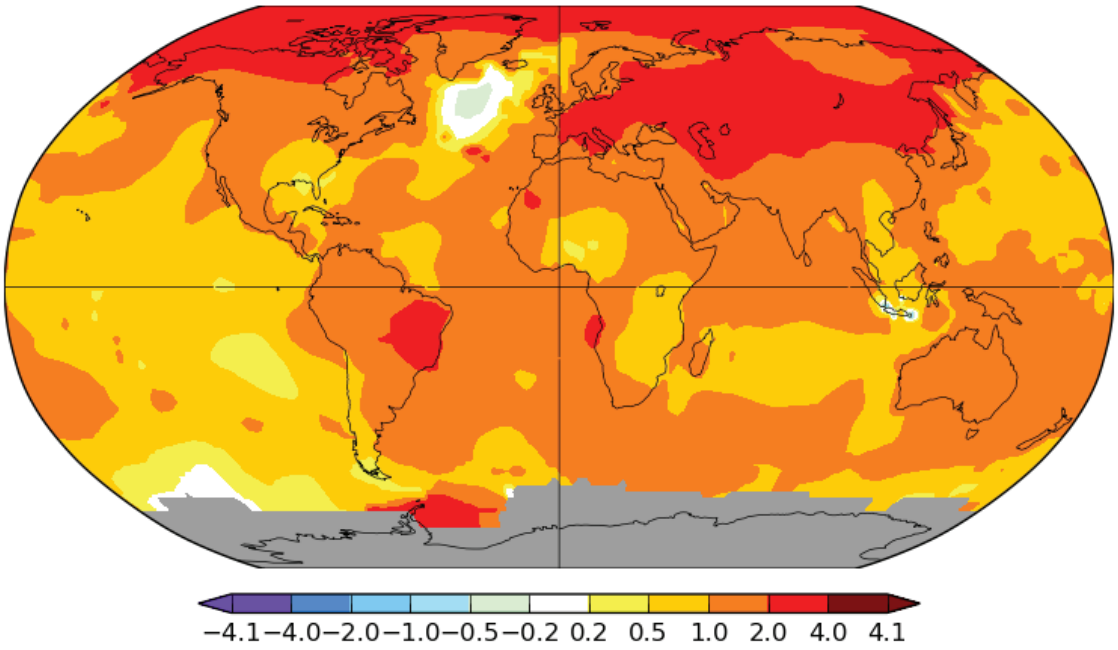
Le problème du changement climatique

1 Le problème du changement climatique

Le changement climatique est l'un des problèmes les plus urgents de notre époque. Il y a de cela trente ans, seuls les scientifiques parlaient de changement climatique, mais aujourd'hui, il concerne la plupart d'entre nous. Nous avons pu constater que le climat s'était réchauffé et qu'il était de plus en plus difficile de prédire le temps qu'il fera quel que soit le moment de l'année. Nous remarquons également la fréquence et la gravité accrues des événements extrêmes, tels que les tempêtes, les ouragans, les vagues de chaleur, les précipitations et les sécheresses.

Le fait que le climat de notre planète évolue, et ce rapidement, ne laisse aucun doute. Jugez par vous-même : depuis la deuxième moitié du XXIe siècle, la température moyenne sur Terre a augmenté d'1,2 °C. Cela peut sembler insignifiant, mais à l'échelle mondiale, cela représente une menace sérieuse pour toute forme de vie présente sur notre planète, des plantes aux animaux, en passant par nous-mêmes. Et gardez à l'esprit que la moyenne mondiale est de près de 1,2 °C, mais que le réchauffement est plus fort au-dessus des terres que dans les océans, et plus fort dans l'Arctique. Le réchauffement est également plus fort dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud, dont la plus grande superficie absorbe davantage le rayonnement solaire et la circulation océanique. Le réchauffement s'est également produit à un rythme plus rapide après les années 1970 que dans la première moitié du XXIe siècle.

Figure 1.1 **1.1. Carte des variations de la température de surface observées sur Terre entre 1901 et 2022.**



Les zones en gris indiquent que les données sont insuffisantes

La Terre se réchauffe !

Selon l'Organisation météorologique mondiale, la température moyenne mondiale sur Terre en 2023 était d'environ 1,4 °C supérieure à la moyenne des années 1850-1900. Cela signifie que 2023 a été l'année la plus chaude depuis le début des relevés en 1850.

Le philosophe grec Héraclite a inventé l'expression « panta rhey » (tout coule) pour exprimer le concept de changement. Cela vaut également pour le climat, qui évolue constamment depuis des millions d'années. Il y a encore 125 millions d'années, les températures moyennes mondiales étaient supérieures d'environ 1 °C à celles d'aujourd'hui.

Mais le rythme rapide du changement climatique au cours des dernières décennies a des conséquences périlleuses pour la planète et tous ses habitants.

Il serait d'ailleurs plus juste de parler de « changement climatique » plutôt de que « réchauffement climatique », car la hausse des températures ne représente qu'une partie de ce que le changement climatique implique pour la Terre. Les changements climatiques se manifestent par une perte d'équilibre partout dans la nature : les glaciers et le pergélisol fondent, le niveau des océans monte, les inondations, sécheresses et ouragans sont plus fréquents, et le temps est de plus en plus difficile à prédire. Le changement climatique entraîne l'extinction de nombreuses espèces animales et végétales, qui ne peuvent s'adapter aux nouvelles conditions, perturbe l'économie des pays et menace également la santé et même la vie des populations.

Il existe différentes théories sur les raisons à l'origine de ces changements climatiques. Certains chercheurs estiment que ces changement sont dûs à l'impact des processus astronomiques (activité solaire accrue ou modification de l'axe de rotation de la Terre), tandis que d'autres pensent que les problèmes climatiques résultent d'une consommation excessive des ressources naturelles par l'homme. Chose certaine, l'activité solaire et la modification de l'axe de rotation de la Terre sont au-delà de notre contrôle, tandis que la consommation excessive et l'émission connexe de gaz à effet de serre nocifs pour le climat sont des choses sur lesquelles nous pouvons agir.

Il n'existe aucun pays qui ne subisse les effets drastiques du changement climatique. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sont supérieures de plus de 50 % à celles de 1990. L'augmentation des émissions de GES entraîne des changements durables dans notre système climatique, qui risquent d'avoir des conséquences irréversibles si nous n'agissons pas.

L'objectif d'action climatique (objectif 13), l'un des 17 objectifs de développement durable adoptés par les Nations Unies en 2015, vise à répondre à la nécessité de s'adapter au changement climatique et d'investir dans un développement à faible émission de carbone.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et ses conclusions les plus récentes

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental des Nations Unies. Le GIEC a été créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement pour faire progresser les connaissances scientifiques et la compréhension du changement climatique, de ses facteurs et de ses conséquences, ainsi que de la manière d'y faire face.

Le GIEC fournit aux gouvernements les informations scientifiques les plus récentes sur le changement climatique. Il ne mène pas ses propres recherches mais évalue toute la littérature scientifique pertinente. Cela inclut les changements observés dans le système climatique et leurs projections ; les impacts et les risques naturels, économiques et sociaux découlant du changement climatique, ainsi que les options et opportunités pour atténuer le changement climatique et s'adapter à ses conséquences. Des milliers de scientifiques et d'autres experts se portent volontaires pour examiner d'énormes volumes de publications et refléter leurs conclusions dans des « rapports d'évaluation » destinés aux décideurs politiques et au public.

Le GIEC est la source d'informations et d'évaluations scientifiques la plus fiable sur le changement climatique, car d'éminents climatologues et gouvernements approuvent ses conclusions. Les rapports du GIEC jouent un rôle clé dans les conférences annuelles sur le climat des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), connues sous le nom de COP. Chacun des six rapports d'évaluation (AR) publiés par le GIEC a conduit à des avancées majeures dans les négociations de la CCNUCC. Le premier rapport d'évaluation a été essentiel aux négociations qui ont conduit à l'adoption de la CCNUCC en 1992, le deuxième rapport d'évaluation aux négociations du Protocole de Kyoto en 1997 et le cinquième rapport d'évaluation aux négociations de l'accord historique de Paris en 2015.

Le rapport le plus récent du GIEC est son sixième rapport d'évaluation (AR6) publié entre 2021 et 2023. Bon nombre de ses conclusions figurent dans cette édition du Module sur le climat (Fig. 1.2).

Figure 1.2 **Points saillants des principaux messages de l'AR6 du GIEC**

« Il est incontestable que les activités humaines sont à l'origine du changement climatique, rendant les événements climatiques extrêmes, notamment les vagues de chaleur, les fortes précipitations et les sécheresses, plus fréquents et plus graves. « Les preuves sont claires : il faut agir maintenant. »

« Les preuves sont claires : il faut agir maintenant. »

Vous pouvez en savoir plus sur :

https ://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/

Alors, qu'arrive-t-il réellement à notre météo et à notre climat ? Comment le climat de la Terre a-t-il changé dans le passé et comment évolue-t-il aujourd'hui ? Qu'est-ce qui est responsable des changements qui se produisent ? Que sont les gaz à effet de serre et que pouvons-nous faire contre eux ? Essayons de trouver quelques réponses à ces questions.

1.1 Climat et temps

Les gens se plaignent souvent du temps, mais ne se plaignent pratiquement jamais du climat. Un exemple : « Octobre s'éloigna sous la pluie battante et les rugissements du vent et novembre s'installa, avec sa froideur d'acier, ses matins de givre et ses courants d'air glacés qui mordaient les mains et le visage. » (J.K. Rowling, Harry Potter et l'Ordre du Phénix). Les écrivains et les poètes écrivent rarement au sujet du climat. Et il est facile de comprendre pourquoi. On peut connaître le temps simplement en regardant par la fenêtre. La météo fait partie de notre quotidien. Mais le climat est une notion plus difficile à appréhender. Tout le monde, des scientifiques aux politiciens en passant par les hommes d'affaires, parle de l'évolution du climat.

Lorsque vous rentrez de vacances avec vos parents en provenance d'un lieu éloigné de votre domicile, la première chose que les gens veulent savoir, c'est quel temps il faisait. Si vous recommandez à vos amis de partir en vacances au même endroit, vous leur direz certainement : « Le climat y est très agréable. » Quelle est donc la différence entre temps et climat ?

LE TEMPS

est l'état de l'atmosphère, en un lieu donné, à un moment donné ou pour une durée limitée (par exemple, un jour ou un mois).

Le temps est donc l'état momentané de ce que nous appelons les « données météorologiques », dont nous entendons parler chaque soir à la télévision au moment des prévisions météorologiques : température, humidité, pression atmosphérique, couverture nuageuse, etc. Lorsque les températures chutent pendant une semaine en été et qu'il pleut si fort que nous n'avons même pas envie de mettre le nez dehors, on parle de mauvais temps.

LE CLIMAT

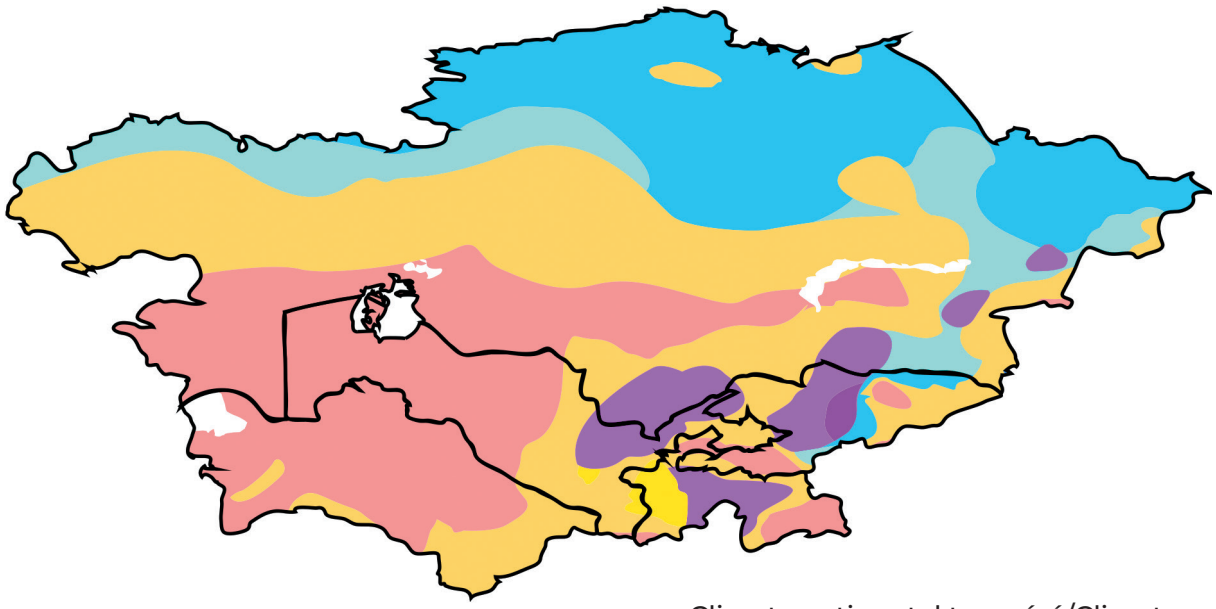
est l'état moyen du temps, en un lieu donné, sur une longue période de temps (plusieurs décennies).

Par exemple : les étés sont chauds et secs, tandis que les hivers sont froids et humides avec de rares chutes de neige. Il s'agit d'une brève description du climat méditerranéen. Comme le dit le proverbe : « le climat c'est ce à quoi l'on s'attend, le temps c'est que l'on obtient ». On ne peut connaître le climat simplement en regardant par la fenêtre !

Les principales caractéristiques du climat sont :

- la température de l'air et ses variations en fonction des saisons ;
- la quantité et la durée des précipitations (pluie et neige) au cours de l'année ;
- les mouvements des masses d'air ;
- les vents dominants et autres vents.

Figure 1.1.1 **Exemple de carte climatique pour l'Asie centrale (par W. Köppen).**



LA MASSE D'AIR

correspond à une zone importante de l'atmosphère dans laquelle les conditions de température, de pression et d'humidité sont globalement uniformes.

L'observation, l'étude et la prévision du temps font l'objet d'une branche des sciences de l'atmosphère, appelée la météorologie. La climatologie est une autre branche des sciences de l'atmosphère concernée par la description du climat, l'analyse des causes des différences et des changements climatiques et de leurs conséquences pratiques.

Le peuple irlandais a pour coutume de dire en plaisantant : « l'Irlande possède un merveilleux climat, mais le temps gâche tout ».

L'Irlande est un pays situé sur une grande île au large du littoral de l'Europe de l'Ouest. Le temps en Irlande est très capricieux, mais les hivers sont doux et l'herbe verdoie toute l'année. De ce fait, l'Irlande est souvent appelée l'« île d'Émeraude ».

Quelles sont les données météorologiques permettant de déterminer les conditions météorologiques ?

La **température de l'air** peut être positive ou négative. Le point de rupture entre température positive et négative se situe à 0 °C, lorsque l'eau gèle et se transforme en glace.

L'**humidité de l'air** dépend de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Lorsque l'humidité est plus élevée en hiver, nous avons plus froid. Mais lorsque l'humidité est élevée et la température ambiante également, l'air est étouffant.

Les **nuages** sont un amas de très petites gouttelettes ou de cristaux de glace dans l'atmosphère.

Les **précipitations** varient selon qu'elles proviennent des nuages (pluie, neige, pluie glacée, grêle) ou se forment à la surface du sol et sur les objets (rosée, gel, givre, glace).

La **visibilité** est la distance maximale à laquelle il est possible de distinguer clairement un objet.

Le **brouillard** est un amas formé à partir de la condensation de vapeur d'eau près du sol.

La **pression atmosphérique** correspond à la pression de l'air à un certain niveau dans l'atmosphère

Le **vent** est le mouvement horizontal de l'air causé par des différences de pression atmosphérique.

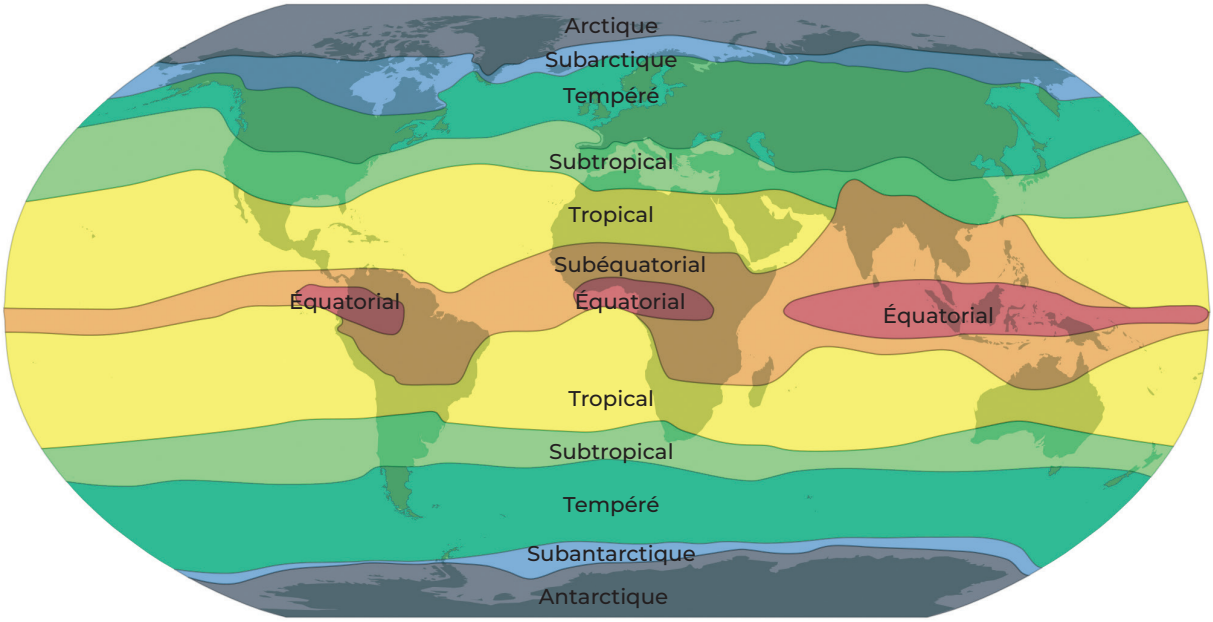
1.2 | Les types de climat et les zones climatiques

Les différentes parties du globe bénéficient de climats différents. Dans les pays du nord, lorsque les gens regardent par la fenêtre en hiver et voient de la neige partout, ils rêvent de partir en vacances dans des pays tropicaux, où ils pourront profiter du soleil et se baigner dans les eaux chaudes de la mer quel que soit le moment de l'année.

Depuis les temps les plus anciens, les scientifiques ont divisé la Terre en différentes zones climatiques en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de la durée du jour. Le terme « climat » provient du grec, et désigne, dans cette langue, l'angle d'inclinaison du soleil. Les différences climatiques observées sur notre planète tiennent principalement au fait que la chaleur du soleil est distribuée de manière inégale sur la surface de la Terre. La proximité de la mer, la circulation atmosphérique, les régimes de précipitations et autres « facteurs climatiques » jouent également un rôle important dans la détermination du climat et, à leur tour, dépendent grandement de la position géographique et de l'altitude.

Les régions bénéficiant de climats similaires forment comme de larges rayures encerclant le globe. C'est ce que les scientifiques appellent les « zones climatiques », et elles deviennent de plus en plus froides à mesure qu'elles s'éloignent de l'équateur (Fig. 1.2.1).

Figure 1.2.1 **Les climats de la Terre (par Boris Alisov)**



LES ZONES CLIMATIQUES

sont des zones possédant un climat relativement uniforme

Le système de classification des climats le plus connu a été élaboré par un climatologue russe allemand du nom de Wladimir Köppen en 1884 (Fig. 1.1.1). Celui-ci a divisé les climats en cinq types principaux : **A** – Tropical, **B** – Sec, **C** – Tempéré, **D** – Continental, **E** – Polaire et Alpin.

Un autre système de classification des climats, communément utilisé en Europe de l'Est, a été élaboré dans les années 1950 par le scientifique russe Boris Alisov (Fig. 1.2.1). Cette classification distingue quatre zones climatiques principales dans chaque hémisphère de la Terre, ainsi que trois zones de transition.

Les principales zones climatiques sont les suivantes : **équatoriale, tropicale, tempérée et polaire (arctique dans l'hémisphère Nord et antarctique dans l'hémisphère Sud)**. Elles sont considérées comme les principales zones climatiques, car chacune d'entre elles est dominée, tout au long de l'année, par les mêmes masses d'air.

Entre les principales zones climatiques se trouvent les zones de transition suivantes : **subéquatoriale, subtropicale et subpolaire (subarctique dans l'hémisphère Nord et subantarctique dans l'hémisphère Sud)**. Les zones climatiques de transition comportent toute dans leur appellation le préfixe « sub », qui en latin signifie « sous ».

Les masses d'air parcourant les zones climatiques de transition varient selon les saisons, et y pénètrent depuis les zones voisines à différents moments de l'année. Par exemple, dans un climat subtropical, l'été est chaud comme sous les tropiques, mais l'hiver est frais, car la masse d'air tropical est remplacée par une masse d'air provenant de la zone tempérée.

Certaines zones climatiques comptent des régions climatiques spécifiques dotées d'un **climat continental**, **maritime** ou **de mousson** (cf. tableau 1.2.1).

Les saisons dans les hémisphères Sud et Nord sont diamétralement opposées : de décembre à février, lorsque la saison froide sévit dans l'hémisphère Nord, c'est l'été dans l'hémisphère Sud, et lorsque l'hémisphère enregistre ses températures les plus basses, l'hémisphère Sud enregistre pour sa part les plus élevées.

Tableau 1.2.1 Les climats de la Terre (par B. Alisov)

Zone climatique	Type de climat	Température moyenne		Période et quantité de précipitations atmosphériques	Circulation atmosphérique et vents dominants	Territoire
		Hiver	Été			
Équatorial	Équatorial	+26 °C	+26 °C	Sur l'ensemble de l'année, 2 000 mm	Les masses d'air équatoriales chaudes et humides se forment dans une région à faible pression atmosphérique	Régions équatoriales d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Océanie
Subéquatorial	Mousson tropicale	+20 °C	+30 °C	Principalement durant la mousson, 2 000 mm	Mousson	Asie du Sud et du Sud-Est Afrique occidentale et centrale, Australie du Nord
Tropical	Tropical sec	+12 °C	+35 °C	Sur l'ensemble de l'année, 200 mm	Alizés	Afrique du Nord, Australie centrale
Subtropical	Méditerranéen	+7 °C	+22 °C	Principalement durant la période froide de l'année, 500 mm	En été, anticyclones à forte pression atmosphérique ; en hiver, cyclones	Méditerranée, Afrique du Sud, Sud-Ouest de l'Australie, Ouest de la Californie
	Subtropical sec	0 °C	+40 °C	Sur l'ensemble de l'année, 120 mm	Masse d'air continentales sèches	Intérieur des terres entre 30 et 45° nord et sud de l'équateur
Tempéré	Maritime tempéré	+2 °C	+17 °C	Sur l'ensemble de l'année, 1000 mm	Vents d'ouest	Parties occidentales de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord
	Continental tempéré	-15 °C	+20 °C	Sur l'ensemble de l'année, 400 mm	Vents d'ouest	Intérieur des terres du 40-45e parallèle aux cercles polaires
	Temperate monsoon	-20 °C	+23 °C	Mousson tempérée Principalement pendant la mousson d'été, 560 mm	Monsoon	Frontières orientales de l'Eurasie
Subpolaire (subarctique et subantarctique)	Subarctique	-25 °C	+8 °C	Sur l'ensemble de l'année, 200 mm	Les cyclones prédominent	Régions septentrionales de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord
	Subantarctique	-20 °C et inférieur	Environ 0 °C	Sur l'ensemble de l'année, jusqu'à 500 mm	Les cyclones prédominent	Océans de l'hémisphère Sud à partir du 60e parallèle de latitude sud
Polaire (Arctique ou Antarctique)	Polaire (Arctique ou Antarctique)	-40 °C	0 °C	Sur l'ensemble de l'année, 100 mm	Les anticyclones prédominent	Océan Arctique et partie continentale de l'Antarctique

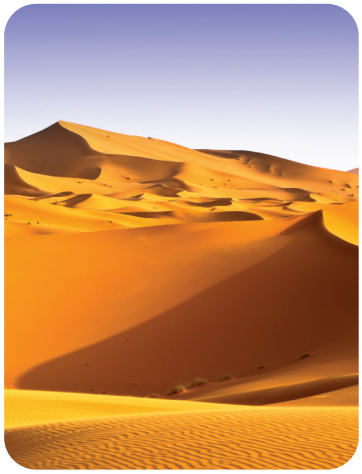
Brève description des différents climats

Climat équatorial

Le climat équatorial se caractérise par des masses d'air équatoriales chaudes et humides. La température de l'air est constante (+24 à 28 °C) et il pleut beaucoup tout au long de l'année (de 1 500 à 5 000 mm). Les pluies s'accumulent plus vite que l'eau ne peut s'évaporer du sol, par conséquent le sol dans un climat équatorial est saturé d'eau et recouvert d'une haute et dense forêt pluviale. Les régions bénéficiant d'un climat équatorial sont le nord de l'Amérique du Sud, le littoral du golfe de Guinée, le bassin du fleuve Congo et les cours supérieurs du Nil en Afrique, la majeure partie de l'archipel indonésien et les régions adjacentes des océans Indien et Pacifique en Asie.

Climat subéquatorial

Le climat subéquatorial se caractérise, en été, par une saison pluvieuse suivie, en hiver, d'une saison douce et sèche. Les précipitations dans un climat subéquatorial sont très contrastées au cours de l'année. Par exemple, dans la ville de Conakry (capital de la Guinée), il ne tombe que 15 mm de pluie de décembre à mars, contre 3 920 mm de juin à septembre. Ce type de climat se retrouve dans certaines parties de l'océan Indien, de l'océan Pacifique occidental, ainsi qu'en Asie du Sud et dans les régions tropicales de l'Afrique et de l'Amérique du Sud.



Climat tropical

Le climat tropical est dominé par des anticyclones à haute pression atmosphérique, donnant lieu à un temps clair presque toute l'année. Il se compose de deux saisons : la saison chaude et la saison froide. Les températures peuvent varier de +20 °C sur le littoral à +50 °C à l'intérieur des terres. La température peut également fortement varier au cours d'une même journée : un après-midi d'été, la température de l'air monte jusqu'à +40 - 45 °C, mais redescend la nuit à + 10-15 °C. Les déserts se trouvent souvent dans des régions bénéficiant d'un climat tropical, le plus grand d'entre eux étant le désert du Sahara en Afrique. Les forêts de feuillus (forêts qui perdent leurs feuilles en hiver) et les savanes sont répandues dans les régions plus humides. Le Mexique, l'Afrique du Nord et du Sud, l'Australie centrale et la péninsule arabique jouissent d'un climat tropical.

Climat subtropical

Le climat subtropical se trouve dans les régions situées entre les latitudes tropicales et tempérées, entre 30 et 45 degrés nord et sud de l'équateur. Ces régions se caractérisent par des étés chauds et tropicaux, et des hivers assez frais. La température moyenne en été est supérieure à +22 °C et en hiver inférieure à -3 °C, néanmoins l'arrivée de masses d'air provenant des régions polaires en hiver peut entraîner une chute des températures jusqu'à -10 ou -15 °C, et même jusqu'à -25 °C occasionnellement. Ce type de climat est typique de la Méditerranée, de l'Afrique du Sud, du Sud-Ouest de l'Australie et du Nord-Ouest de la Californie.

Climat tempéré

Le climat tempéré se retrouve aux latitudes dites tempérées (de 40-45 degrés nord et sud de l'équateur jusqu'aux cercles polaires). Dans l'hémisphère Nord, plus de la moitié de la zone tempérée est occupée par des terres plutôt que par la mer. Cependant, 98 % des zones tempérées de l'hémisphère Sud sont formées d'océans. Le climat tempéré se caractérise par des changements climatiques extrêmes et fréquents dus aux cyclones. La principale caractéristique du climat tempéré est la division de l'année en quatre saisons : une saison froide (hiver), une saison chaude (été) et deux demi-saisons de transition (printemps et automne). La température moyenne au cours du mois le plus froid est généralement inférieure à 0 °C, tandis qu'au cours du mois le plus chaud, celle-ci est supérieure à +15 °C. Le sol est couvert de neige en hiver. Les vents dominants d'ouest apportent de la pluie et de la neige tout au long de l'année, avec des précipitations et chutes de neige variant de 1 000 mm sur le littoral à 100 mm à l'intérieur des terres.

Climat subpolaire (subarctique, subantarctique)

On trouve un climat subarctique entre l'Arctique et les zones tempérées de l'hémisphère Nord. Ce climat se caractérise par des masses d'air à température modérée en été et des masses d'air froid provenant de l'Arctique en hiver. Les étés sont courts et frais, la température de l'air étant rarement supérieure à +15 °C le jour et chutant entre 0 et +3 °C la nuit, et peuvent également être marqués par quelques nuits glaciales. En hiver, la température est de -35 à -45 °C, de jour comme de nuit. Le paysage dans une région subarctique est fait de toundra et de toundra forestière, le sol se compose de pergélisol, et il y a peu de plantes ou d'animaux. Le nord de la Russie et du Canada, l'Alaska (USA), le sud du Groenland et l'extrême nord de l'Europe bénéficient d'un climat subarctique.

Le climat subantarctique se retrouve dans l'hémisphère Sud, entre la zone tempérée et la zone antarctique. La majeure partie de la zone subantarctique est composée d'océan. Les précipitations et chutes de neige annuelles dans ces régions s'élèvent à 500 mm.

Climat polaire (arctique, antarctique)

Le climat polaire se retrouve au nord du 70^{e} parallèle dans l'hémisphère Nord (climat arctique) et au sud du 65^{e} parallèle dans l'hémisphère Sud (climat antarctique). Les masses d'air polaire dominent tout au long de l'année. Le soleil ne se lève pas pendant plusieurs mois (cette période est baptisée la « nuit polaire ») et ne se couche pas pendant plusieurs autres mois (« soleil de minuit » ou « journée polaire »). La neige et la glace reflètent davantage la chaleur qu'elles ne l'absorbent, l'air est donc très froid et la neige ne fond jamais. La pression atmosphérique est élevée toute l'année (anticyclone), les vents sont donc faibles et il n'y a quasiment pas de nuages. Il y a très peu de chutes de neige, l'air est rempli de petites pointes de glace et un brouillard d'eau se forme souvent en été. La température moyenne en été est inférieure à 0 °C, et en hiver se situe entre -20 et -40 °C.

Où se trouvent les endroits les plus froids et les plus chauds sur Terre ?

L'endroit le plus froid sur Terre se trouve dans les plaines orientales de l'Antarctique. En août 2010, le satellite Aqua de la NASA y a enregistré une nouvelle température minimale record de -93,2 °C (Fig. 1.2.2 et 1.2.3). Néanmoins, il est peu probable que ce record soit officiellement reconnu, car les normes scientifiques actuelles imposent de mesurer la température de l'air à la surface de la Terre, et non depuis l'espace, pour que les mesures puissent être déclarées comme exactes. Des analyses plus récentes effectuées par des chercheurs de la NASA font ressortir que des températures au même endroit ont chuté encore plus bas, jusqu'à -98 °C. La température minimale record internationalement reconnue demeure établie à -89,2 °C, niveau enregistré à la station de recherche soviétique (désormais russe) de Vostok en Antarctique le 21 juillet 1983 (Fig. 1.2.4). Le village d'Oymyakon, dans l'est de la Sibérie, est l'endroit habité constamment le plus froid de la planète, avec des températures hivernales moyennes de -50 °C. La journée la plus froide jamais enregistrée dans la ville a eu lieu en 1924, lorsque les températures ont plongé jusqu'à -71,2 °C.

L'endroit le plus chaud sur notre planète est la Vallée de la mort aux USA, où une température record de +56,7 °C à l'ombre a été enregistrée le 13 juillet 2013 (Fig. 1.2.5). L'OMM vérifie actuellement deux mesures de température de +54,4 °C, enregistrées au même endroit, le 16 août 2020 et le 9 juillet 2021. Si elles sont validées, ce serait la température la plus élevée sur Terre depuis 1913.

Figure 1.2.2

Le satellite américain Aqua a été lancé par la NASA en 2002 afin d'étudier les processus physiques de la Terre.

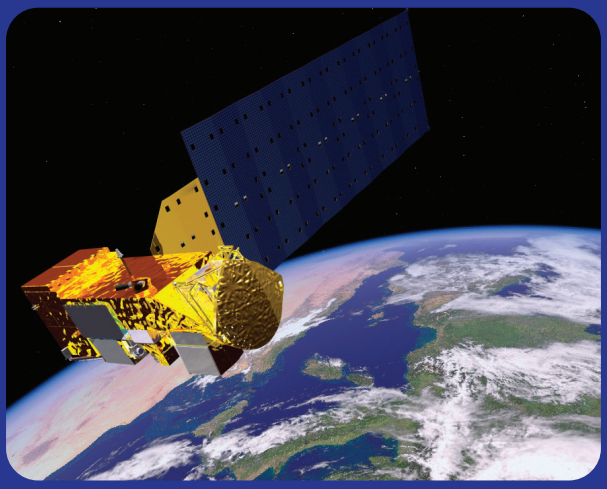


Figure 1.2.3

Données relatives à la température de l'air en surface en Antarctique, provenant des satellites américains de la NASA Aqua de 2003 à 2013 et Landsat 8 en 2013.

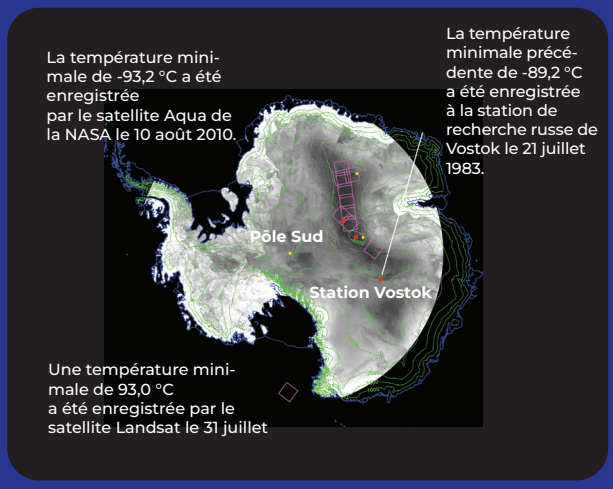


Figure 1.2.4 **Station de recherche russe à Vostok en Antarctique**

Figure 1.2.5 **La Vallée de la mort, USA**

QUESTIONS

1. Lorsque c'est l'hiver dans l'hémisphère Nord, quelle saison est-ce dans l'hémisphère Sud ?

2. Qu'est-ce que le vent ? Quels types de vent connaissez-vous ? Quelles sont leurs différences ? Dans quels climats prédominent-ils et pourquoi ?

3. Dans quelle zone climatique vivez-vous ? "Que savez-vous sur la météo à différentes périodes de l'année dans votre zone climatique ?

4. Dans quelles zones climatiques les plantes et les animaux ont-ils le plus de difficulté à survivre ?

5. Où fait-il le plus froid : au pôle Nord ou au pôle Sud ?

6. Quel est votre niveau de connaissances en terminologie climatique ? Testez-vous avec le Dictionnaire climatique du PNUD : https ://www.undp.org/publications/climate-dictionary

EXERCICES

1

Jeu
Matériel : Cartes mentionnant les différentes caractéristiques des différents types de climat : équatorial, tropical, tempéré, polaire. Il s'agit d'un jeu pour 12 à 24 personnes. Chaque joueur reçoit une carte comportant une caractéristique climatique.
Le but du jeu est de parler avec les autres joueurs et de réunir, pour chaque groupe de joueurs, les différentes caractéristiques représentatives d'un climat donné. Chaque équipe mime ensuite aux autres groupes le type de climat qu'elle représente.

2

Le célèbre écrivain américain Mark Twain a dit une fois en plaisantant : « Si vous n'aimez pas la météo en Nouvelle-Angleterre, attendez quelques minutes ». Pourquoi l'écrivain se moque-t-il du climat et du temps en Nouvelle-Angleterre ?

Trouvez la Nouvelle-Angleterre sur une carte des USA. Dans quelle zone climatique se trouve-t-elle ?

3

Qu'est-ce que des conditions climatiques « favorables » et « défavorables » ?
Faites des groupes et choisissez un type de climat.
Faites des simulations et inventez des blagues concernant le type de climat que vous avez choisi.

4

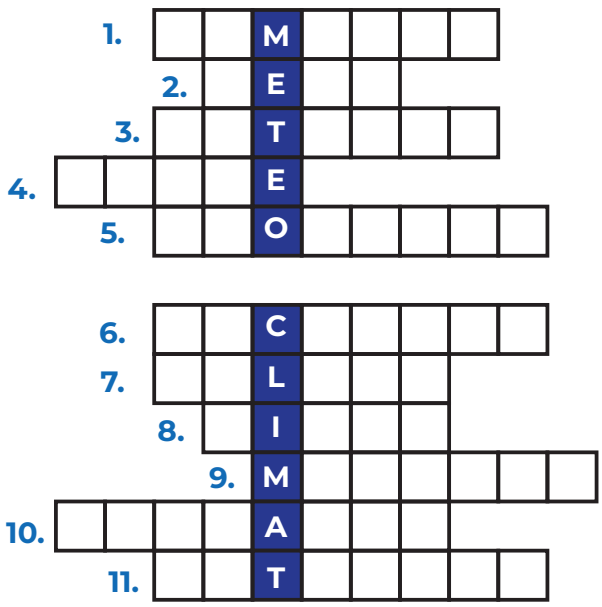
Jeu
But du jeu : Avoir l'impression d'être dans un climat tropical et faire l'expérience d'une pluie tropicale journalière.
Comment jouer : Les joueurs forment un cercle. L'animateur se place au centre du cercle et effectue des mouvements à l'intention du reste du groupe. Chaque fois qu'il fait un mouvement, l'animateur tourne sur son axe. Il ne commence un nouveau mouvement que lorsque tous les joueurs composant le cercle ont commencé à imiter le mouvement précédent. Chaque joueur ne passe au mouvement suivant que lorsque l'animateur se trouve en face de lui. Pendant ce temps, les autres joueurs continuent le mouvement précédent.
Ordre des mouvements : L'animateur et le premier joueur (puis le second joueur, le troisième, etc.) joignent leurs paumes et effectuent des mouvements circulaires lents. Ils claquent ensuite des doigts, tapent des mains, se tapent les cuisses et enfin tapent des pieds. Une fois la séquence finie, toutes les actions sont répétées en ordre inverse. Le but est d'imiter le son d'une violente averse du début à la fin.

5

MOTS CROISÉS

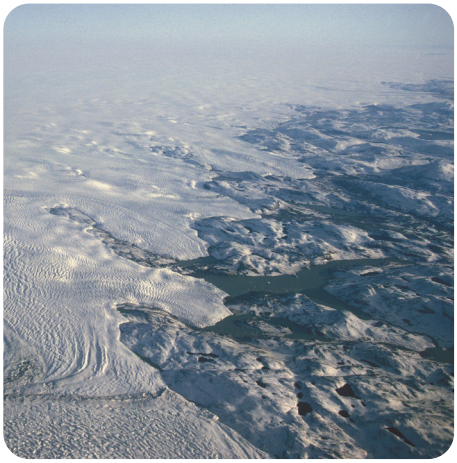
1. Un phénomène météorologique violent avec des vents forts et parfois de la pluie.
2. Le mouvement de l'air causé par des différences de pression atmosphérique.
3. Une des saisons de l'année, marquée par la chute des feuilles.
4. Précipitations solides sous forme de petites billes de glace.
5. Un type de climat chaud et humide, typique des régions proches de l'équateur.

6. La région polaire située au nord de la Terre, avec des températures très basses.
7. L'étoile qui fournit lumière et énergie à la Terre et influence le climat.
8. Une saison froide, associée à la neige et aux basses températures.
9. Un vent saisonnier apportant souvent des pluies abondantes dans certaines régions.
10. Compositeur italien célèbre pour ses œuvres intitulées Les Quatre Saisons.
11. La hauteur au-dessus du niveau de la mer, influençant le climat et la température.



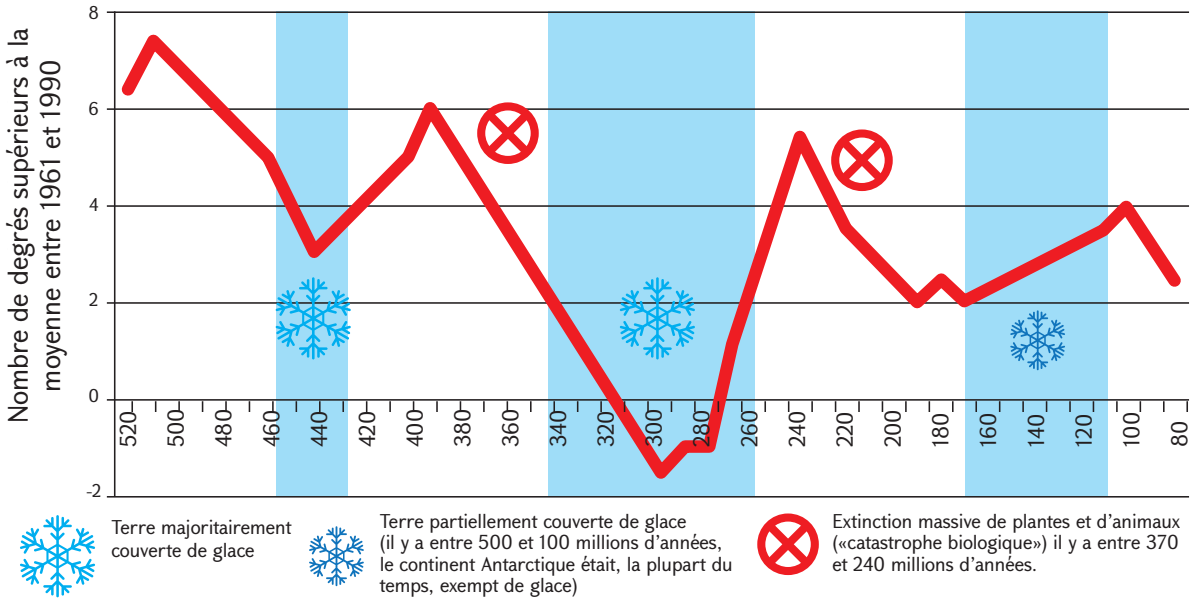
1.3 Comment et pourquoi le climat a changé par le passé

Il n'est pas difficile de démontrer que le climat de la Terre a toujours été soumis à des changements. Bien sûr, les personnages de dessins animés et de jeux vidéo concernant les dinosaures et la période glaciaire sont le fruit de l'imagination, mais les dinosaures ont réellement existé, comme en témoignent les os et œufs de dinosaures qui ont été retrouvés. Lorsque ces animaux étaient vivants, le climat sur notre planète était bien plus chaud qu'il ne l'est aujourd'hui. Toutefois il y a eu des périodes de froid, où le climat était bien plus froid qu'il ne l'est actuellement, et où les glaciers s'étendaient jusqu'à Berlin ou Chicago et étaient aussi hauts qu'un immeuble de plusieurs étages !



Au cours des centaines de millions d'années d'existence de la Terre, la température sur Terre a énormément varié – d'environ 10 °C (Fig. 1.3.1). Cela est considérable ! Si les températures d'aujourd'hui étaient plus élevées de 10 °C, alors le climat à Stockholm serait très différent : la température moyenne au cours de l'année dans la capitale suédoise serait celle actuellement enregistrée sur la côte méditerranéenne, par exemple à Barcelone ou à Marseille. Ce serait bien, non ? Mais dans ce cas, il ferait dans le sud de l'Europe aussi chaud qu'à Dubaï. Quant à la Péninsule arabique, il y ferait sûrement trop chaud pour pouvoir y vivre !

Figure 1.3.1 **La température sur Terre au cours des 500 derniers millions d'années**



Comment les scientifiques ont-ils pu déterminer quel était le climat par le passé ?

Les scientifiques sont parvenus à déterminer quelle était auparavant la température sur Terre grâce à l'étude des roches et sédiments situés au fond des lacs, des mers et des océans. La glace laisse des traces sur les roches, tandis que les sédiments issus des anciennes mers contiennent les restes de plantes qui ne pouvaient survivre qu'à certaines températures.

Les scientifiques disposent d'une meilleure source d'information pour déterminer les températures de ce dernier million d'années : ils utilisent la glace de l'Antarctique. La glace contient des bulles d'air qui témoignent de la composition de gaz dans l'atmosphère et de la température sur Terre par le passé (Fig. 1.3.2). Les données les plus anciennes (environ 800 000 ans) proviennent de la station russe de Vostok, installée en Antarctique.

Les cernes des arbres sont une bonne source d'information sur le changement climatique des siècles précédents. Les cernes issus d'années chaudes sont plus larges, tandis que ceux issus d'années froides sont plus étroits. Les coquilles des mollusques marins et d'eau douce sont également un bon indicateur du climat passé.

La science qui permet d'étudier le climat du passé est appelée paléo-climatologie.

Figure 1.3.2 **Les scientifiques extraient une carotte de la calotte glaciaire de l'Antarctique, qui leur permettra de déterminer la température de l'air et la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère au fil des millénaires.**

1.3.1 | Les causes du changement climatique : en millions d'années

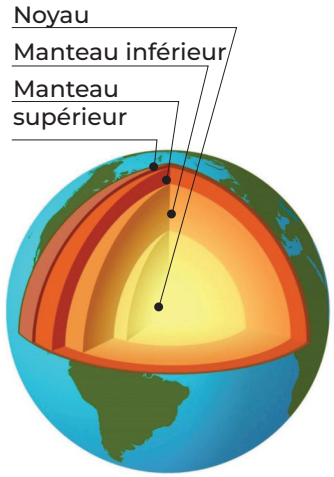
Pour tenter d'expliquer les changements climatiques majeurs qui se sont produits sur Terre depuis le dernier demi-milliard d'années, les scientifiques se sont intéressés à plusieurs facteurs géologiques, astronomiques, biologiques, géomagnétiques et cosmiques. Ils ont même envisagé la possibilité de visiteurs d'autres planètes, qui auraient pu utiliser une certaine forme d'armes climatiques. Toutefois, les scientifiques n'ont trouvé aucune trace d'intervention extraterrestre. Ils ont par contre découvert que la température de notre planète au cours des quelques centaines de millions d'années passées était déterminée par l'emplacement des continents sur le globe !

Des continents en mouvement

La croûte terrestre n'est que la fine couche de surface de notre planète (Fig. 1.3.3). Sous cette couche débute le manteau, lequel constitue l'élément majeur de la planète et se transforme en un liquide extrêmement chaud et visqueux au niveau des couches les plus profondes. La croûte et les couches supérieures du manteau sont composées de plaques relativement dures (« lithosphériques ») susceptibles de se fissurer, de s'écarter les unes des autres et de se rassembler, se décalant de quelques centimètres chaque année, mais de plusieurs milliers de kilomètres sur des millions d'années ! C'est ce que l'on appelle la « dérive des continents ». L'unique et l'ancien continent de Pangée s'est progressivement divisé en plusieurs continents distincts, qui se sont séparés et sont entrés en collision les uns avec les autres (Fig. 1.3.4). Si l'on observe la partie ouest de l'Afrique et la partie est de l'Amérique du Sud, on s'aperçoit qu'elles s'imbriquent parfaitement ensemble, comme les pièces d'un puzzle, et cela car elles ont autrefois fait partie d'un seul et même continent qui s'est par la suite divisé.

Figure 1.3.3

Les couches de la terre



Les continents proches de l'équateur n'accumulent pas de glace, mais s'ils se trouvaient proches des pôles, ils seraient rapidement ensevelis sous les glaciers (masses de glace) que nous pouvons actuellement observer en Antarctique ou au Groenland. La surface blanche de la glace et de la neige réfléchit le rayonnement solaire et le renvoie vers l'espace, permettant ainsi à la glace et la neige de rester froides, tandis que les surfaces sombres de la terre ou de l'eau absorbent presque intégralement le rayonnement solaire et se réchauffent donc.

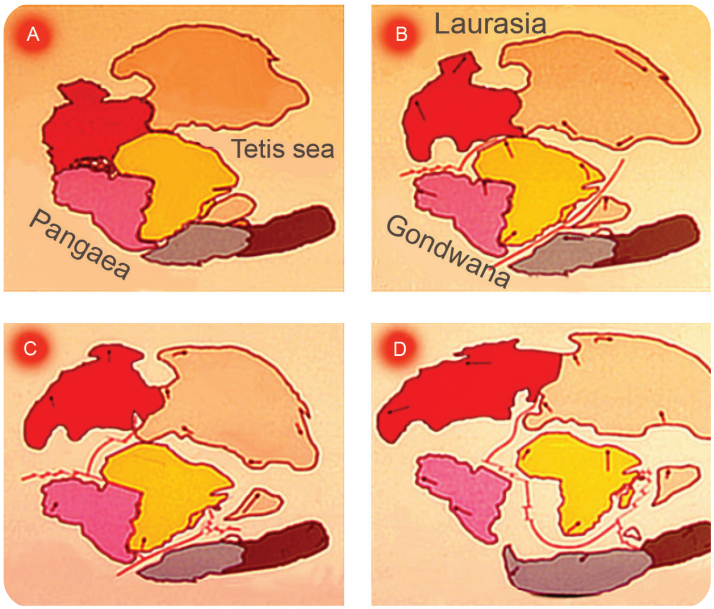


Figure 1.3.4

Dérive des continents durant les 500 derniers millions d'années.

A – formation de la Pangée
B – division du continent de Pangée, formation de la Laurasie et du Gondwana
C – dissociation du Gondwana, formation de l'Hindustan, de l'Australie et de l'Antarctique
D – formation de l'Amérique du Sud, début de la division de la Laurasie

Lorsque cela se produit sur un large périmètre, ce processus devient le principal facteur influençant le climat de l'ensemble de la planète. Pendant la majeure partie de ce dernier demi-milliard d'années, les continents ont eu moins de couverture glaciaire qu'ils n'en ont actuellement, le climat de la Terre était donc plus doux.

La surface blanche de la glace et de la neige réfléchit le rayonnement solaire et le renvoie vers l'espace, permettant ainsi à la glace et la neige de rester froides, tandis que les surfaces sombres de la terre ou de l'eau absorbent presque intégralement le rayonnement solaire et se réchauffent donc.

Lors des changements climatiques majeurs, notamment lorsque des périodes de refroidissement, ce que l'on appelle des « catastrophes biologiques » se sont produites des espèces entières d'organismes vivants ont disparu, et seules ont survécu les espèces les mieux adaptées aux nouvelles conditions.

L'une de ces vagues de froid, survenue il y a 60 millions d'années, a entraîné la disparition des derniers dinosaures. Ce processus a dû se mettre en place progressivement, et durer plus de mille ans. La cause exacte de l'extinction des dinosaures n'est pas connue, et pourrait être multiple.

Pourquoi les dinosaures ont-ils disparu ?

Les dinosaures ont finalement disparu complètement de la Terre il y a environ 60 millions d'années. Les scientifiques ne connaissent toujours pas avec exactitude la cause de leur disparition.

L'une des théories consiste à dire que les dinosaures n'auraient pas été en mesure de rivaliser avec certains organismes vivants plus « sophistiqués ». Par exemple des mammifères à sang chaud, qui n'étaient pas plus gros qu'un écureuil, mais pouvaient manger les œufs de dinosaures ou les attaquer la nuit, lorsque les dinosaures à sang froid étaient incapables de bouger.

Selon une autre théorie, une météorite géante aurait frappé la Terre au niveau de la zone correspondant actuellement à la mer des Caraïbes, ayant entraîné la formation d'énormes quantités de poussière qui se seraient répandues dans l'atmosphère de la Terre, masquant ainsi les rayons du soleil pendant une période de temps considérable. Les oiseaux, les mammifères et de nombreux autres organismes se sont adaptés aux nouvelles températures, mais pas les dinosaures.

Il existe une autre version. Nous savons que pour certains reptiles (crocodiles, tortues), la température du sol détermine si des mâles ou des femelles écloront des œufs enfouis dans le sable en bord de mer ou de rivière. Les biologistes ont élaboré la théorie selon laquelle cette dépendance aurait également pu concerner les dinosaures, qui étaient également des reptiles, de très gros reptiles. Si la température a été telle que seules des femelles (ou des mâles) ont éclos des œufs de dinosaures, l'espèce a pu rapidement disparaître sans l'intervention d'aucune catastrophe ni d'aucune météorite.

Le passage d'un climat invariable et humide à un climat comportant des changements saisonniers (même de petits changements) pourrait avoir laissé la place à de brèves périodes de nuits froides, durant lesquelles les énormes corps de reptile des dinosaures n'ont pu retenir suffisamment de chaleur. Nombre de ces animaux se seraient alors affaiblis et auraient fini par mourir.

Mais le changement climatique le plus important est intervenu il y a de cela 50 millions d'années, lorsque les continents se sont éloignés des pôles. La couverture de neige et de glace a diminué, et les températures ont augmenté jusqu'à 12 °C au-dessus des températures actuelles. Puis, « soudainement », l'Inde qui n'était auparavant qu'une petite plaque lithosphérique indépendante, a percuté l'Eurasie. Les montagnes de l'Himalaya sont pparues à l'endroit de la collision. Les autres plaques se sont déplacées autour, de sorte que l'Antarctique a pris place au pôle Sud et s'est couvert d'une couche de glace (il y a 30 ou 40 millions d'années). La température de la Terre a commencé à chuter brusquement, car la glace blanche de l'Antarctique a commencé à réfléchir le rayonnement solaire et à le renvoyer dans l'espace.

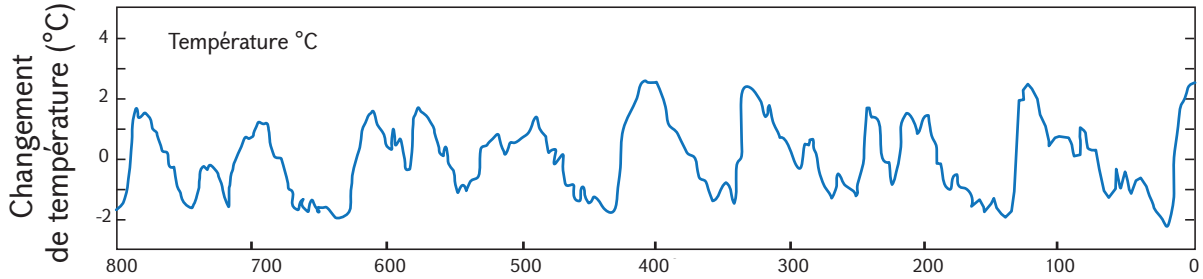
Il y a environ 10 millions d'années, le Groenland s'est établi à sa position actuelle et s'est couvert d'une couche de glace, ce qui a contribué à abaisser davantage les températures, à des niveaux proches des températures actuelles.

Il y a 100 millions d'années, il faisait bien plus chaud sur Terre qu'aujourd'hui. Il y a 30 ou 40 millions d'années, l'Antarctique s'est recouvert de glace, phénomène qui s'est reproduit avec le Groenland il y a 10 millions d'années, entraînant une chute des températures à leur niveau actuel.

1.3.2 Les causes du changement climatique en dizaines de milliers d'années

Nous savons que la température sur Terre évolue tous les un million d'années. Il a été démontré que tous les 100 000 ans environ, nous connaissons une période de réchauffement relativement courte, alors que le reste du temps, le climat est bien plus froid (« période glaciaire » ou « âge glaciaire »). Actuellement, nous vivons une période de réchauffement.

Figure 1.3.5 **Évolution de la température sur Terre ces 800 000 dernières années par rapport à la température moyenne.**

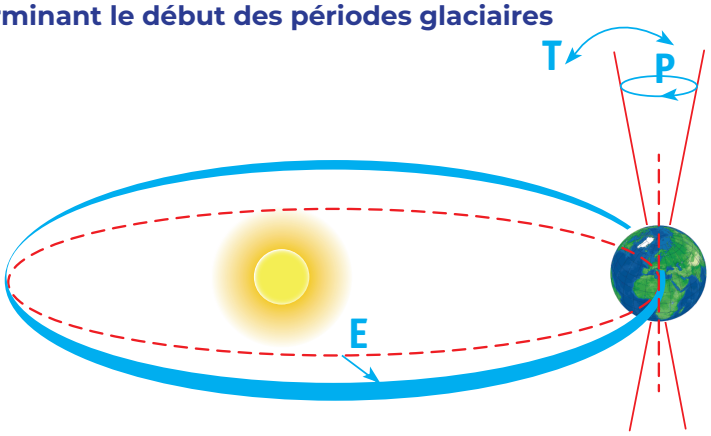


Quelle en est la raison ? Selon les scientifiques, l'alternance de périodes glaciaires et de périodes plus chaudes est d'origine astronomique (Fig. 1.3.6).

Tous les 41 000 ans, l'inclinaison de l'axe de la Terre se modifie pour s'établir à un angle compris entre 22 degrés et 24,5 degrés (il est actuellement à 23,5 degrés). Cette variation influe sur la durée de la nuit polaire dans les régions polaires, qui est plus longue à certaines périodes et plus courtes à d'autres. Cela n'a aucun effet sur la quantité totale de chaleur du Soleil atteignant la Terre, mais a une incidence sur l'intensité et la longueur de la saison hivernale.

Figure 1.3.6

Modification de l'orbite de la Terre et de la rotation de la Terre autour de son axe, déterminant le début des périodes glaciaires



T — angle d'inclinaison de l'axe de la Terre
E — modification de l'orbite de la Terre (déviation de l'orbite par rapport à une orbite circulaire)
P — modification de la trajectoire de l'axe de rotation de la Terre

La Terre achève une rotation de son axe avec une périodicité de 19 000 à 23 000 ans. Lorsque vous faites tourner une toupie, sa pointe reste bien droite au début, puis commence à décrire des cercles, et enfin s'arrête de tourner et tombe. La Terre est semblable à une toupie. Il n'y a évidemment aucune chance que celle-ci s'arrête de tourner au cours des quelques millions d'années à venir, toutefois un ralentissement a pu être observé et l'axe de la terre ne pointe pas dans la même direction dans l'espace. Les cercles décrits par l'axe de rotation de la Terre n'ont aucune incidence sur la quantité de chaleur du Soleil atteignant la Terre (pas plus que l'inclinaison de l'axe), mais influent sur l'intensité et la durée de la saison hivernale sous les latitudes polaires.

L'orbite de la Terre autour du Soleil se modifie tous les 400 000 et 100 000 ans environ. Lorsque l'orbite de la Terre suit la forme d'un cercle, les variations saisonnières au niveau des flux de chaleur émanant du soleil sont moindres que lorsque l'orbite suit une forme elliptique.

Lorsque les hivers dans les régions polaires sont plus longs et plus rudes, et que les chutes de neige sont plus importantes, moins de neige fond en été, et l'accumulation forme des glaciers. Ces glaciers blancs, contrairement à la surface sombre du sol ou de l'eau, réfléchissent la quasi-totalité du rayonnement solaire qui les atteint. En conséquence, le froid s'intensifie et les glaciers continuent de se développer, en se déplaçant des pôles vers les régions tempérées. Une période glaciaire commence alors (Fig. 1.3.7).

Après quelques dizaines de milliers d'années, les conditions changent de telle manière que les hivers dans les régions polaires et tempérées raccourcissent et s'adoucissent. Les glaciers entament leur recul et le climat revient à ce qu'il était avant. C'est ce qui s'est produit il y a 13 000 ans, à la fin de la dernière période glaciaire.

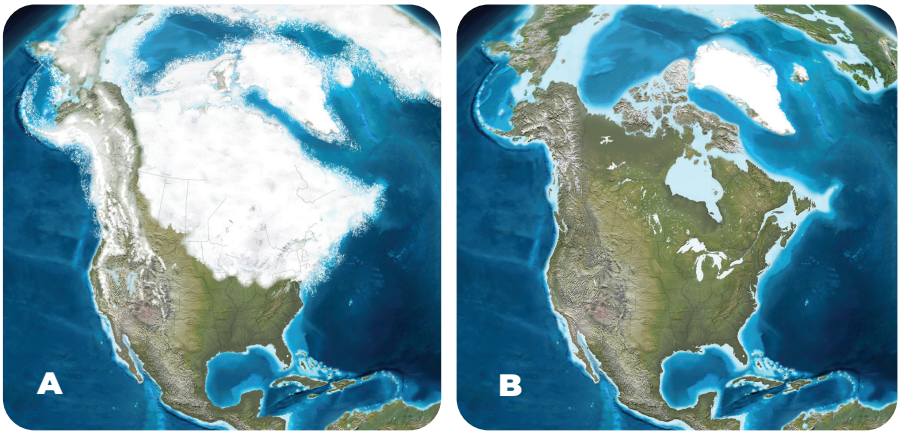


Figure 1.3.7

L'Amérique du Nord durant
A - l'ère glaciaire il y a 125 000 ans
B - de nos jours

Il y a environ 5 000 à 7 000 ans, le climat était plus chaud et plus humide qu'il ne l'est à l'heure actuelle, ce qui a créé des conditions propices au développement de la civilisation humaine ; il serait, cependant, erroné de penser qu'un réchauffement de quelques degrés serait bon pour la civilisation moderne. L'homme d'aujourd'hui a des besoins différents et des conditions de vie différentes : une abondance d'herbe pour les animaux domestiques et une profusion de gibier à chasser dans les forêts ne suffisent plus au bon fonctionnement de la société moderne.

Le niveau des océans de la Terre s'est modifié au rythme de l'apparition et de l'achèvement des périodes glaciaires. Durant les périodes de froid, le niveau de la mer était 50 à 100 m en-deçà du niveau actuel. À cette époque, les peuples anciens passaient de l'Eurasie à l'Amérique principalement par voie terrestre, et sur une partie du trajet traversaient un étroit détroit couvert de glace. Au cours des quelques centaines de milliers d'années passées, pendant les périodes de réchauffement, le niveau de la mer était égal au niveau actuel ou 5-10 m au-dessus.

Combien de dizaines de milliers d'années reste-t-il jusqu'à l'avènement sur Terre de la prochaine période glaciaire ? La complexité des périodes de modification de l'orbite terrestre et de la rotation de la Terre autour de son axe ne permet pas aux scientifiques de prédire si cette période interviendra dans 15 000, 20 000 ou 30 000 ans.

Deux choses sont néanmoins claires. Premièrement, cela arrivera. Nos lointains descendants seront probablement capables de s'adapter, car le climat sous les latitudes centrales et tropicales ne sera pas beaucoup plus froid qu'il ne l'est à l'heure actuelle. Deuxièmement, la prochaine période glaciaire ne frappera pas du jour au lendemain, elle ne s'installera pas en l'espace d'une année ou même de cent ans, mais prendra des centaines de milliers d'années pour faire son apparition. La perspective de périodes glaciaires à venir ne revêt aucune importance pour le climat du dernier millénaire ou pour celui des prochains siècles.

L'histoire climatique de la Terre est, depuis des millions d'années, caractérisée par l'apparition et l'achèvement de périodes glaciaires. Approximativement tous les 100 000 ans, le climat se réchauffe. La période chaude dure entre 20 000 et 40 000 ans, puis est suivie d'une autre période de refroidissement. L'apparition d'une nouvelle période glaciaire est inéluctable, mais n'interviendra pas avant 15 000 ou 30 000 ans. La perspective d'une nouvelle « ère glaciaire » n'a pas d'incidence sur le changement climatique qui se produit actuellement et qui se produira au cours des siècles à venir.

1.3.3 | Les causes du changement climatique en siècles

Différentes parties de la Terre ont connu un réchauffement et un refroidissement à divers moments au cours du dernier millénaire. Durant plusieurs décennies, la température de l'air a enregistré des variations substantielles de 3-4 °C. Bien sûr, le thermomètre n'existait pas il y a mille ans (l'homme n'est capable de mesurer la température que depuis 300 ans), mais les preuves existantes de périodes fertiles (chaudes) et moins fertiles (froides) ayant survécu témoignent de fluctuations climatiques importantes. Les scientifiques peuvent également tirer des conclusions relatives aux températures enregistrées par le passé en étudiant les dépôts présents au fond des mers et des rivières, ainsi que d'autres signes. Les cernes des arbres sont une excellente source d'information.

Selon les scientifiques, les variations de température périodiques constatées depuis des décennies sont dues à l'activité solaire, aux éruptions volcaniques et processus qui se produisent dans les océans du monde.

Fluctuations de l'activité solaire

L'intensité du rayonnement solaire varie périodiquement et présente des cycles de 11 ans. Toutefois, des observations menées au début du XVIIe siècle ont également constaté des cycles de modification de l'activité solaire d'une durée de 40–45 ans, 60–70 ans, 100 ans et 200 ans.

Les variations du rayonnement solaire sont généralement légères, mais lorsque plusieurs périodes de faible activité solaire se cumulent, la température de la Terre chute de façon importante. Tel a par exemple été le cas entre 1640 et 1715, période baptisée le « Petit âge de glace ».

À cette époque, durant la saison hivernale, les Néerlandais faisaient du patin à glace sur les canaux gelés d'Amsterdam. Peu de temps après, la vague de froid a pris fin et l'utilisation de patins à glace s'est raréfiée (Fig. 1.3.8).

Figure 1.3.8

Néerlandais faisant du patin à glace sur un canal gelé. Estampes de la série « Fashionable characters » de H. Fischer II (Pays-Bas, 1682-1702)

Éruptions volcaniques

Quel phénomène naturel nous surprend le plus par sa puissance et son énergie ? La réponse est assurément l'éruption volcanique. Selon vous, les volcans réchauffent-ils l'atmosphère de la Terre ou la refroidissent-ils ? De prime abord, on peut penser qu'ils contribuent à réchauffer l'atmosphère. Il est vrai que la lave chaude et les gaz brûlants entrainent une hausse de la température de l'air, mais uniquement à proximité du volcan. L'impact le plus fort sur le climat provient, non pas de la lave ou des gaz chauds, mais des cendres volcaniques. L'éruption les propulse loin dans la stratosphère, à 10 ou 15 km d'altitude, où elles demeurent un certain laps de temps. Les cendres bloquent certains des rayons du soleil, ce qui entraîne le refroidissement de l'ensemble du globe.

Toute éruption volcanique puissante propulsant une colonne de cendres dans la stratosphère provoque, un an plus tard, un bref refroidissement. Par exemple, après les Guerres napoléoniennes en Europe, les gens se sont demandés pourquoi le climat avait viré au froid pendant un certain nombre d'années. La raison en a été l'éruption du volcan Tambora sur les terres de l'Indonésie actuelle (Fig. 1.3.9). La même chose s'est produite en 1983 après l'éruption du volcan El Chichon au Mexique, et en 1992 après l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines.

Au bout de 2 ou 3 ans, les cendres disparaissent, et les volcans n'ont alors plus d'incidence sur le climat de la Terre, jusqu'à ce que la prochaine éruption majeure rejette de nouveau des cendres dans la stratosphère.

Les éruptions d'une telle ampleur sont rares, et la plupart des éruptions dont nous entendons parler n'affectent pas le climat de la Terre. À titre d'exemple, l'éruption en 2010 du volcan islandais au nom imprononçable, Eyyafyad-layëkyudl, a rejeté un volume important de cendres, mais uniquement dans la partie inférieure de l'atmosphère. Les avions ont été cloués au sol dans toute l'Europe, mais les cendres produites par ce volcan islandais ont rapidement disparu et ne se sont pas propagées sur l'ensemble du globe.

Figure 1.3.9

Volcan Tambora sur l'île de Sumbawa en Indonésie. L'éruption massive de 1815 a entraîné l'effondrement de la partie supérieure du volcan, formant ainsi un cratère de 6 km de large et de 1 km de profondeur.

Courants océaniques

Il a été démontré que la découverte du Groenland, il y a mille ans, par des vikings norvégiens a coïncidé avec une période de réchauffement. D'où le choix de ce nom par les découvreurs. Bien sûr, le Groenland n'était pas complètement vert : des glaciers couvraient la majeure partie de l'île, comme c'est le cas actuellement, cependant l'extrémité sud était vierge de toute glace et relativement chaude. La modification des courants océaniques en est la principale raison : lorsque les courants sont forts, le climat local se réchauffe légèrement ; lorsqu'ils sont faibles, il se refroidit. Ce comportement des courants océaniques a provoqué des périodes de réchauffement et de refroidissement dans différentes régions du monde.

Le climat de la Terre a changé plusieurs fois par le passé. Néanmoins, la température moyenne de la planète n'a jamais changé aussi vite qu'à l'heure actuelle : près de 1,2 °C en 100 ans. Cette rapidité sans précédent est inhabituelle pour les processus naturels. Les changements naturels les plus rapides ont toujours pris plusieurs centaines ou milliers d'années, ce qui est assez lent à l'échelle de la vie humaine. Les catastrophes donnant lieu à un changement climatique radical en l'espace d'un ou deux ans peuvent faire l'objet d'un film catastrophe, mais sont loin d'être une réalité et sont bien loin des prévisions des scientifiques.

QUESTIONS

1. Quel a été le principal facteur de changement climatique durant des milliards d'années ?

2. Quel parfum de glace fond le plus lentement au soleil : la vanille blanche ou le chocolat noir ? Pourquoi ? Comment cela illustre-t-il les processus qui se produisent sur Terre ?

3. Quel déplacement majeur des plaques lithosphériques s'est opéré il y a 50 millions d'années ? Quel a été son impact sur la Terre telle que nous la connaissons ?

4. Quels ont été les outils utilisés par les scientifiques pour déterminer la température et la composition chimique de l'atmosphère durant les 800 000 dernières années ?

5. Pourquoi les périodes glaciaires se produisent-elles ?

6. Quand la dernière période glaciaire a-t-elle pris fin ? Y en aura-t-il une autre ? Pourrait-elle commencer l'année prochaine ?

7. Comment les peuples anciens sont-ils passés de l'Eurasie à l'Amérique ? Ils n'avaient pas de bateaux et la largeur du détroit de Béring est actuellement de 86 km (on ne peut distinguer l'autre rive).

8. Les volcans réchauffent-ils ou refroidissent-ils l'atmosphère de la Terre ?

EXERCICES

1

Posez une feuille de papier calque sur une carte du monde, tracez les contours de l'Afrique et de l'Amérique du Sud et découpez-les. Rapprochez les continents découpés.

Ont-ils l'air de constituer un seul et même territoire ? Comment s'appelait cette terre ? Que lui est-il arrivé ?
Comment cela a-t-il affecté le climat de la Terre ? Pourquoi ?

2

Expérience
Matériel : Deux petites feuilles de papier (blanche et noire) ; deux morceaux de pâte à modeler de 4 cm de long et 0,5 cm d'épaisseur.

L'expérience : collez les feuilles de papier ensemble, de sorte que le côté gauche soit blanc et le côté droit soit noir. Collez les morceaux de pâte à modeler perpendiculairement au dos de la feuille, un sur la partie blanche et l'autre sur la noire. Placez la feuille sur sa tranche et maintenez-la près d'une lampe (de préférence une lampe puissante). La lampe illumine le papier.

Quel morceau de pâte à modeler est tombé en premier lorsque la lampe a chauffé la feuille de papier ? Pourquoi ?
Donnez un exemple de processus semblable se produisant sur Terre.

3

Vous savez déjà que le climat sur Terre à l'époque des dinosaures était plus chaud qu'il ne l'est maintenant. Pour que la planète soit aussi chaude qu'à l'époque des dinosaures, il faudrait que l'Antarctique s'éloigne suffisamment du pôle Sud pour que toute sa glace fonde.

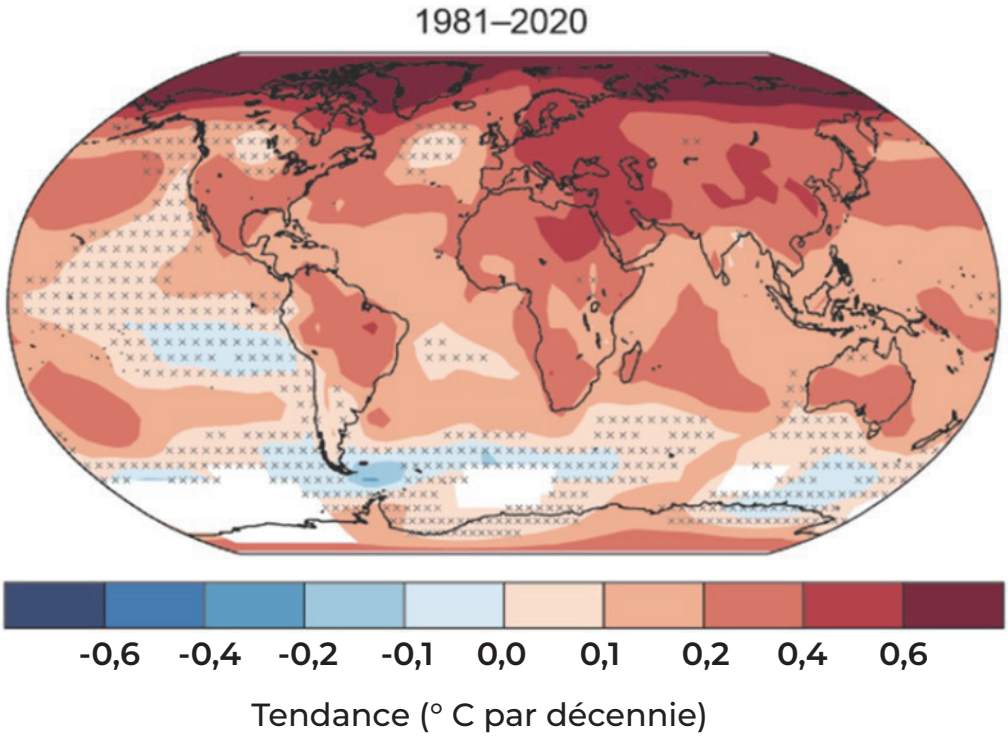
Prenez une carte du monde et, en fonction de son échelle, calculez le nombre de kilomètres que devrait parcourir l'Antarctique pour que son centre atteigne le 40e degré de latitude sud.

En supposant que l'Antarctique se déplace à une vitesse de 2 cm par an, combien d'années faudrait-il pour qu'un réchauffement de la terre résultant uniquement du mouvement de l'Antarctique soit suffisant pour permettre aux dinosaures de vivre de nouveau sur terre.

1.4 Le changement climatique de nos jours

Au cours du dernier siècle, la température de la Terre a commencé à augmenter d'une telle manière que des phénomènes naturels ne pouvaient en expliquer la raison. En 130 ans, la planète s'est réchauffée de près de près de 1,2 °C ! Selon l'AR6 du GIEC, au cours de 50 dernières années, la température mondiale a augmenté à un rythme sans précédent au cours des 2 000 dernières années au moins. Les températures à la surface de la planète n'ont pas été plus chaudes au cours des 125 000 dernières années. Le réchauffement observé et projeté est plus fort sur les terres que sur les océans, et plus fort dans l'Arctique.

Figure 1.4.1 **Carte des tendances comparatives des changement décennaux des températures dans différentes régions du globe (1981-2020 et 1850-1900)**

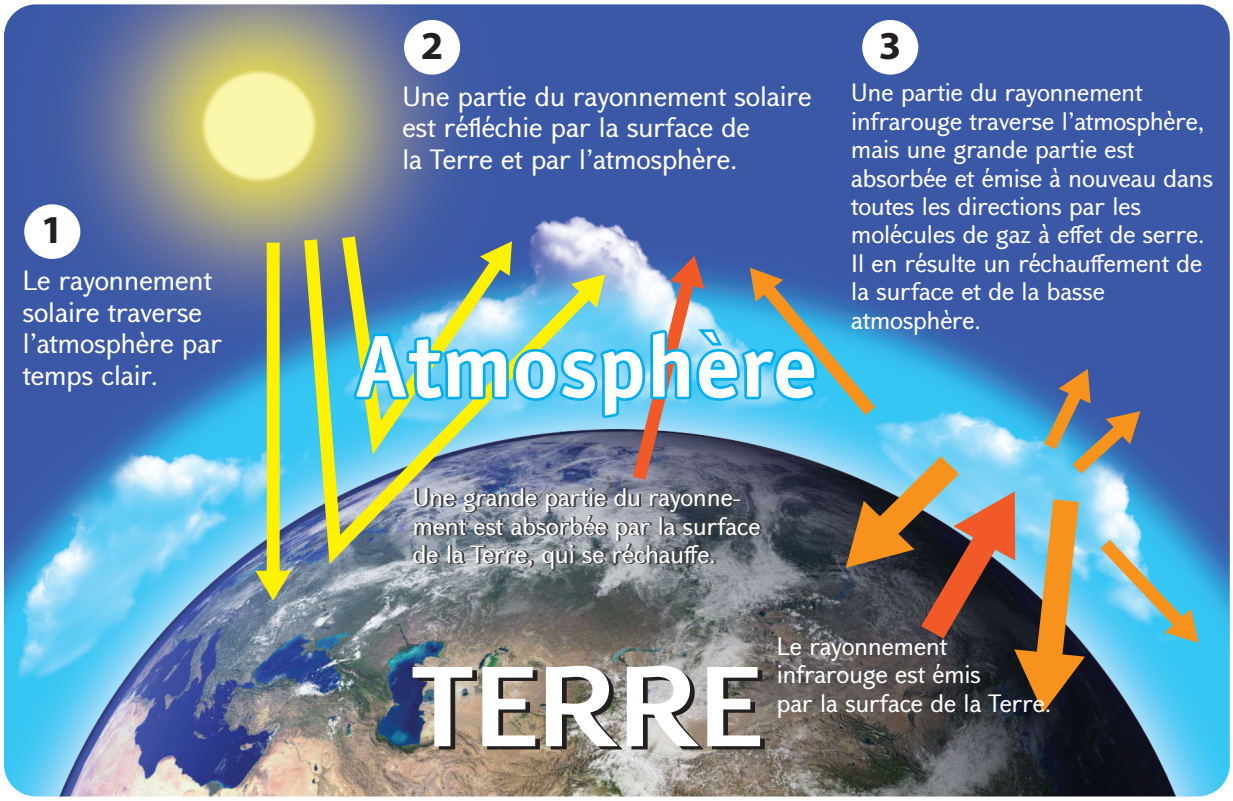


Selon les scientifiques, le réchauffement climatique actuel s'explique par une augmentation de ce que nous appelons « l'effet de serre ».

L'effet de serre

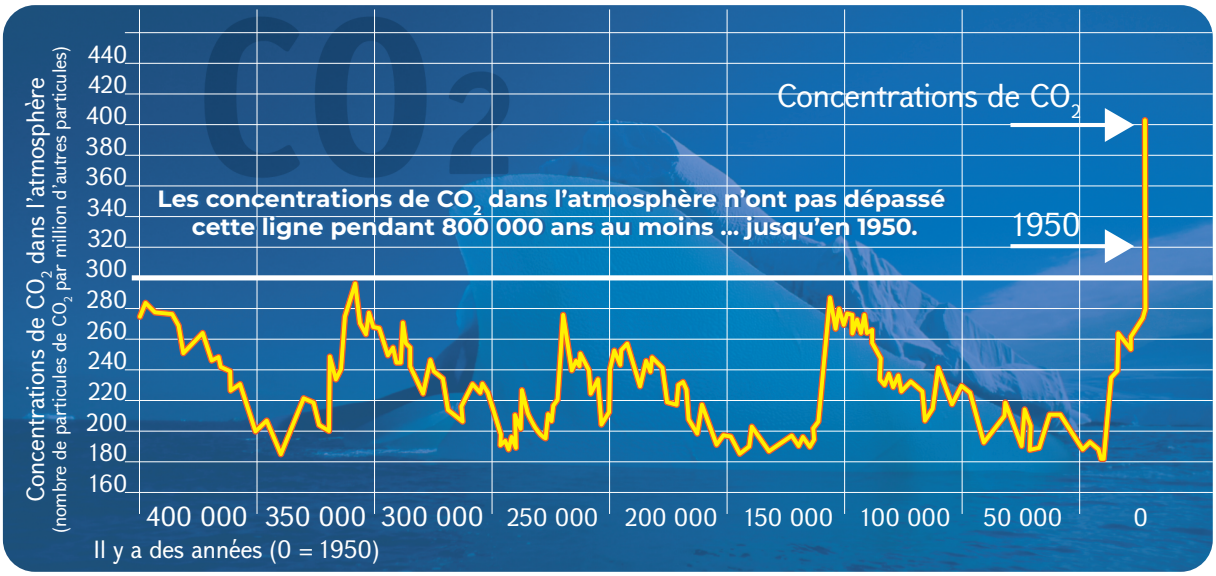
L'effet de serre est le processus par lequel les gaz, la poussière et la vapeur d'eau présents dans l'atmosphère absorbent la chaleur de la Terre et empêchent sa réflexion sur la surface de la Terre. Lorsque les scientifiques ont pour la première fois décrit cet effet il y a de cela 200 ans, ils ont remarqué que l'atmosphère de la Terre agissait comme une serre de culture de légumes. Les gaz qui absorbent le rayonnement thermique de la Terre ont donc été appelés « gaz à effet de serre ». Les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère sont le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote (pour des raisons de commodité nous les désignerons par leurs formules chimiques, CO_2 et CH_4 et N_2O) et d'autres, ainsi que la vapeur d'eau. Ils bloquent le rayonnement infrarouge de la surface de la Terre. En conséquence, la basse atmosphère se réchauffe. Sans l'effet de serre, la température moyenne de l'air à la surface de la Terre ne serait pas de +14 °C comme à l'heure actuelle, mais de -19 °C. La chaleur de la Terre se dissiperait dans l'espace sans réchauffer l'atmosphère. Cela rendrait difficile toute vie sur notre planète.

Figure 1.4.2 **L'équilibre énergétique de la Terre et l'effet de serre**



Les scientifiques prédisent depuis longtemps que la production et la combustion de charbon, de pétrole et de gaz par l'homme entraînerait l'émission d'importantes quantités de CO_2 et CH_4, augmentant ainsi l'effet de serre. Au milieu du XX^{e} siècle, la prédiction s'est confirmée : la concentration de ces gaz a rapidement commencé à croître à l'échelle mondiale (Fig. 1.4.3).

Figure 1.4.3 **Concentrations de CO_2 dans l'atmosphère au cours des 400 000 dernières années**



Les gaz à effet de serre sont la principale cause du changement climatique à l'heure actuelle. En conséquence des activités humaines, essentiellement la combustion de combustibles fossiles, le développement des transports et la déforestation, les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O) ont atteint des niveaux records, plus élevés que jamais au cours des 800 000 dernières années au moins. La concentration naturelle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a varié à travers l'histoire de 180 à 300 parties par million (ppm) d'autres particules ! La dernière analyse des observations de l'OMM montre que les concentrations moyennes mondiales en surface de CO_2, CH4 et N2O ont atteint de nouveaux sommets en 2022, avec du CO_2 à 418 ppm et du N_2O à 336 ppm. Ces valeurs constituent respectivement des augmentations de 150 %, 264% et 124 % par rapport aux niveaux préindustriels. L'hypothèse selon laquelle l'activité humaine serait responsable de la hausse de l'effet de serre a pour la première fois été avancée par le scientifique suédois Svante Arrhenius, dès 1896.

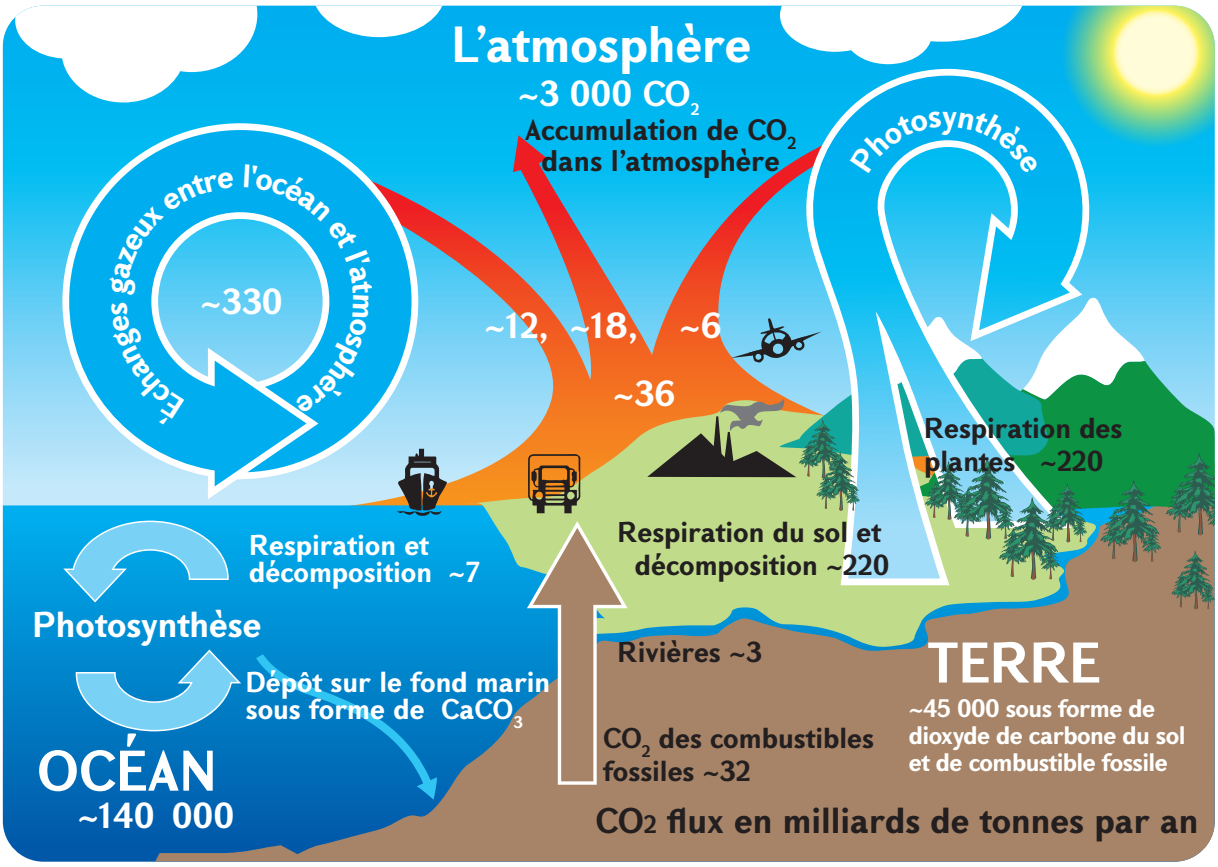
L'augmentation des concentrations de CO_2 est-elle due uniquement à l'activité humaine ou est-ce un processus naturel ?

Les processus naturels tels que la respiration des organismes vivants, la décomposition, les échanges océaniques, l'activité volcanique et les incendies de forêt libèrent du CO_2dans l'atmosphère, jouant un rôle clé dans le cycle du carbone terrestre (Fig. 1.4.4). Cependant l'analyse isotopique révèle que la récente augmentation du CO_2 atmosphérique provient principalement des activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles, dont la composition moléculaire est nettement différente du CO_2 libéré par ces processus naturels.

ANALYSE ISOTOPIQUE

Les atomes d'une même substance peuvent contenir différentes quantités de certaines particules, appelées neutrons. Le nombre de neutrons dans un atome indique si le dioxyde de carbone atmosphérique provient de la respiration des organismes vivants ou de la combustion de charbon, de pétrole et de gaz naturel.

Figure 1.4.4 Cycle du CO_2 dans la nature



Les océans, les forêts et les sols composant notre planète « viennent en aide » à l'homme en absorbant près de la moitié de tout le CO_2 d'origine humaine, néanmoins l'autre moitié s'accumule dans l'atmosphère (Fig. 1.4.5) et augmente l'effet de serre. Cela entraîne donc un réchauffement de l'atmosphère et des océans (Fig. 1.4.6). L'augmentation de la température moyenne mondiale entre 1850 et 2023 (Fig. 1.4.5) illustre la conclusion de l'OMM, basée sur les données des différents centre météorologiques, selon laquelle les neuf dernières années entre 2015 et 2023, ont été les années les plus chaudes jamais enregistrées. Une tendance similaire est observée dans les océans. L'homme a abattu une grande partie des forêts mondiales, réduisant ainsi leur capacité d'absorption du CO_2 présent dans l'atmosphère, nettement moindre que par le passé.

Figure 1.4.5 **Augmentation de la température moyenne sur Terre entre 1850 et 2023, telle qu'elle a été enregistrée par les différents centres météorologiques**

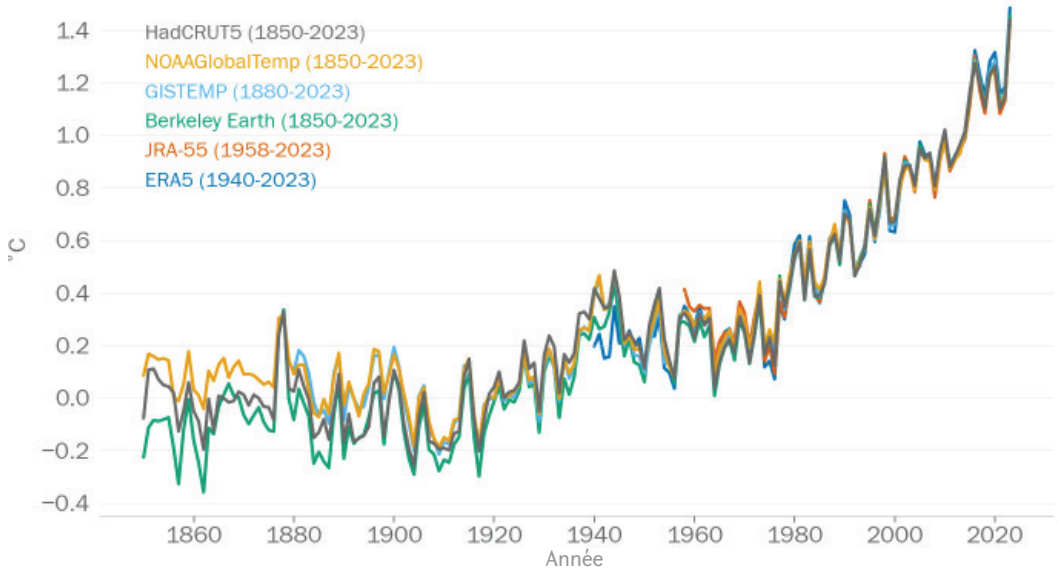
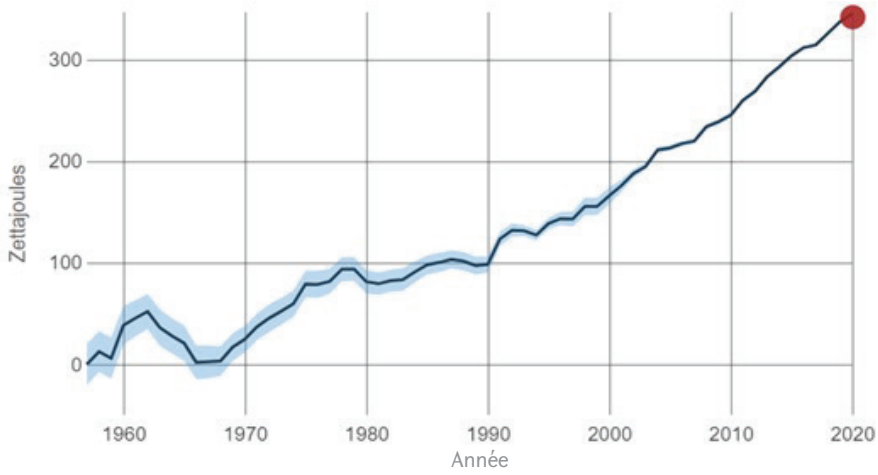


Figure 1.4.6 **Augmentation du contenu thermique des océans du monde entre 1955 et 2020**



Note : le contenu thermique des océans se réfère à la chaleur absorbée et stockée par les océans

L'océan joue un rôle essentiel dans la détermination du climat de la Terre. Il renferme plus de 90 % de l'énergie du système climatique de la planète. Si la température de l'atmosphère avait augmenté sans que cela ne soit le cas de celle de l'océan, il y aurait moins de raison de s'inquiéter. Cela aurait signifié que le principal maillon du système climatique était resté indemne. Malheureusement, la température des océans du monde augmente également d'année en année. Les estimations annuelles du réchauffement de l'océan sur ses 2 000 premiers mètres entre 1955, année du début de la tenue des registres modernes, et 2022 (Fig. 1.4.6) présentent la moyenne sur cinq ans – par exemple, la valeur de 2020 est la moyenne de 2018- 2022. Les climatologues estiment donc que des hivers froids ou même un refroidissement de l'air sur l'ensemble de la planète ne pourraient enrayer le réchauffement climatique, car la quantité de chaleur présente dans le système climatique de la Terre continue dans son ensemble de croître d'année en année, l'augmentation la plus importante concernant l'océan.

Les **aérosols** constituent un autre facteur ayant un impact considérable sur notre climat. Les aérosols sont de petites particules qui se présentent sous plusieurs formes. Ils peuvent être naturels, comme la fumée d'un incendie de forêt, les gaz volcaniques ou les embruns salés. Les activités humaines peuvent également générer des aérosols, tels que des particules de pollution atmosphérique ou de la suie.

Figure 1.4.7 **Aérosols émis par des activités naturelles et humaines**

Le rôle des aérosols dans la science du climat est complexe. En général, les particules de couleur claire présentes dans l'atmosphère réfléchissent la lumière solaire entrante et provoquent un refroidissement. Les aérosols de couleur claire sont ceux formés à partir du dioxyde de soufre (SO_2) émis lors d'une éruption volcanique, qui se combine avec l'eau de l'atmosphère pour former de minuscules particules qui peuvent faire le tour du globe et rester dans l'air pendant quelques années. La combustion de combustibles fossiles libère des particules de sulfate et de SO_2 qui, comme les aérosols volcaniques, peuvent réfléchir la lumière du soleil et refroidir l'atmosphère. Les particules de couleur foncée absorbent la lumière du soleil et réchauffent l'atmosphère. Un exemple de particules de couleur foncée est la suie, constituée de particules de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles, de bois ou d'autres matières végétales. Les aérosols constituent un sujet brûlant dans la recherche climatique en raison du fait que différents types de particules ont des effets différents.

Sans pollution par les aérosols, la Terre serait environ 0,4 °C plus chaude qu'elle ne l'est déjà, selon le rapport AR6 2021 du GIEC. Ceci est à comparer au réchauffement dû aux émissions de gaz à effet de serre estimé à environ 1,5 °C. Ainsi, l'activité humaine réchauffe et refroidit la planète, mais son impact sur le réchauffement climatique (en renforçant l'effet de serre) est environ trois fois supérieur à l'effet refroidissant des aérosols. Il y a donc toutes les raisons de parler de « changement climatique » causé par les êtres humains.

Dès les années 1970, le climatologue Mikhail Budyko a fourni des prévisions précises quant au changement climatique et prédit que l'homme rencontrerait des problèmes d'ici les années 2000 sous forme de changements climatiques inhabituels et « étranges ». Il avait raison.

Depuis que l'homme a commencé à brûler du charbon, la température de l'air à la surface de la Terre a augmenté de 1,2 °C, dont 0,85 °C au cours de ces 50 dernières années (Fig. 1.4.5). De prime abord, la variation semble modérée et ne semble pas représenter une menace. Toutefois, il convient de noter qu'il s'agit là d'une variation moyenne pour l'ensemble de la planète et toutes les époques de l'année. Les chercheurs ont découvert que les pôles de la Terre se réchauffent plus rapidement que la moyenne mondiale, un phénomène connu sous le nom d'amplification polaire. Ce phénomène est déjà observé dans l'Arctique, qui s'est réchauffé près de quatre fois plus vite que la moyenne mondiale au cours des quatre dernières décennies. Des études récentes montrent que l'Antarctique se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne mondiale.

Dans certaines parties de l'Europe, de l'Amérique du Nord et de l'Asie, les hivers sont devenus plus froids et non plus chauds. L'étude de semaines et de mois démontre que la température peut être plus chaude de 10 °C pendant 2 ou 3 semaines, puis plus froide de 9 °C que la moyenne enregistrée dans cette région sur la même période durant la seconde moitié du XX^{e} siècle, avec un réchauffement global de 1 à 2 °C. Le plus frappant, ce n'est pas le changement global, mais le fait que le temps soit devenu beaucoup plus variable, avec de forts vents et d'intenses précipitations et chutes de neige.

Le temps s'est-il également déréglé par le passé ? Bien sûr que oui. Alexandre Pouchkine, le célèbre poète russe, a écrit dans son chef-d'œuvre, Eugène Onéguine (1833) :

« L'automne fût long cette année-là ;
La nature semblait ne pouvoir se résoudre à porter le manteau d'hiver : la neige ne tomba
que dans la nuit du trois janvier… »

Pouchkine utilise ici l'ancien calendrier julien russe, par conséquent son 3 janvier correspond à notre 20 décembre. Cela est toutefois très tard pour voir tomber les premières neiges dans les régions du centre de la Russie européenne ; habituellement, il commence à neiger fin octobre.

Figure 1.4.8 **Tatiana assise sur son lit. Hiver**
Illustration du roman Eugène Onegin, réalisée par Belyukin/Russie, 1999

Le XIX^{e} siècle a lui aussi connu de chaudes journées en hiver et des vagues de froid en été, des tempêtes et des inondations, d'importantes chutes de neige et sécheresses, et même des pluies glacées qui ont tout recouvert d'une fine couche de glace.

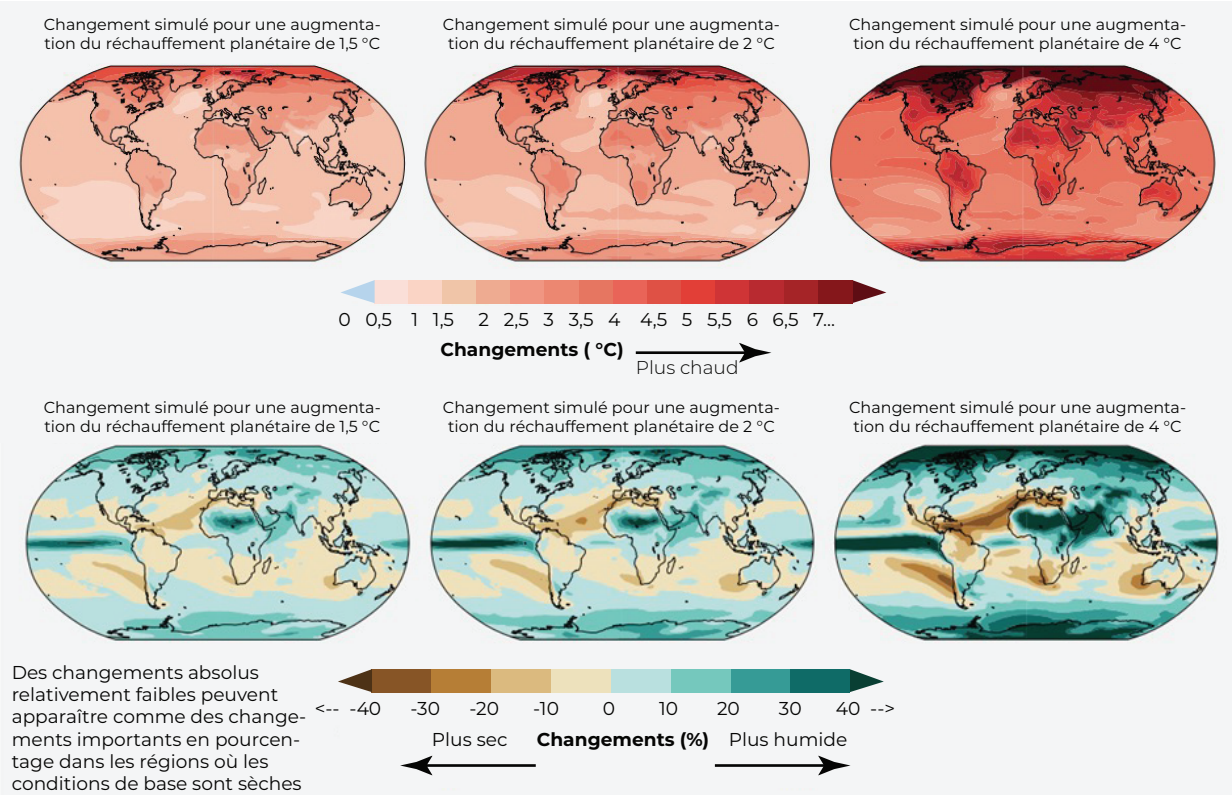
Ce qu'il faut retenir, c'est que ces phénomènes naturels dangereux sont de plus en plus fréquents, et le seront encore davantage à l'avenir. Nous continuerons d'être confrontés à des périodes de grands froids, même si, avec le temps, celles-ci seront probablement moins courantes. Le réchauffement climatique aura certains effets positifs, mais pour le moment nous en voyons davantage les effets négatifs.

À l'aide de modèles informatiques prenant en compte l'ensemble des effets (aussi bien naturels que provoqués par l'homme), les climatologues sont en mesure non seulement d'expliquer ce qui se passe aujourd'hui, mais également de fournir des prévisions pour l'ensemble du XXI^{e} siècle. Selon le niveau d'émissions de gaz à effet de serre, la température sur la Terre pourrait augmenter de façon dramatique au cours du siècle actuel. Dans le meilleur des cas, les changements seront relativement modestes (1,5 à 2 °C) par rapport au début du XX^{e} siècle. Dans le pire des cas, le climat terrestre pourrait se réchauffer de 5 °C. L'Europe du Nord se réchauffera plus rapidement, En outre, l'Arctique s'est réchauffé près de quatre fois plus vite que la moyenne mondiale au cours des quatre dernières décennies et on s'attend à ce que cette tendance au réchauffement continuera à s'accentuer au cours du XXI^{e} siècle. Cela aura des conséquences majeures sur les niveaux de précipitations, le niveau de la mer, la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes. La manière dont s'achèvera le XXI^{e} siècle dépendra en grande partie de l'activité humaine et des mesures que nous allons adopter maintenant. Bien sûr, l'influence du soleil, des volcans, des courants océaniques et des autres processus naturels est également très importante. Mais les changements climatiques qu'ils provoquent sont de courte durée et leur importance sur le long terme est mineure.

Les chercheurs soulignent que chaque fraction de degré de réchauffement climatique entraîne des changements exponentiels dans la température moyenne régionale, les précipitations et l'humidité du sol. Les scientifiques ont utilisé une base de données contenant des centaines de scénarios pour évaluer l'impact du réchauffement climatique sur les indicateurs climatiques, tels que les températures mondiales, les précipitations et l'humidité du sol. Grâce aux améliorations apportées aux modèles mondiaux, ils ont pu produire des évaluations régionales plus précises.

Les études de modélisation nous renseignent désormais sur les changements de la température moyenne annuelle et des précipitations résultant d'augmentations de la température moyenne mondiale de 1,5°, 2° et 4 °C (Fig. 1.4.9). Elles suggèrent qu'en fonction des niveaux de réchauffement, les zones terrestres se réchauffent plus que les zones océaniques, et que l'Arctique et l'Antarctique se réchauffent plus que les tropiques. Ces résultats suggèrent également que les précipitations devraient augmenter dans les hautes latitudes, dans le Pacifique équatorial et dans certaines parties de la région de mousson, mais diminuer dans certaines parties des régions subtropicales et dans des zones limitées des tropiques. De nombreux changements dans le système climatique devraient s'accentuer en relation directe avec l'augmentation du réchauffement climatique, notamment l'acidification des océans, la fonte des glaces dans l'Arctique et l'Antarctique et l'élévation du niveau de la mer.

Figure 1.4.9 **Modifications modélisées de la température moyenne annuelle (au-dessus, °C) et des précipitations annuelles (en dessous, %) par rapport à 1850-1900 pour des augmentations de la température moyenne mondiale de 1,5°, 2° et 4 °C**



Ainsi, la plupart des scientifiques s'accordent sur le fait que l'humanité a probablement joué le rôle le plus important dans le changement climatique qui s'est produit sur Terre au cours des 70 dernières années (depuis le milieu du XX^{e} siècle) et qui se poursuivra au cours du siècle à venir. Ils soulignent avec force la nécessité urgente de réduire les émissions de gaz à effet de serre au cours de la décennie en cours si nous voulons avoir une chance réelle de maintenir la hausse des températures bien en dessous de 2 °C et 1,5 °C.

L'impact humain le plus important sur le système climatique est l'émission de gaz à effet de serre causée par la combustion de combustibles fossiles : charbon, gaz naturel et produits pétroliers. Une réduction de l'utilisation de combustibles fossiles par les centrales, les transports, l'industrie et dans la vie quotidienne contribuerait à réduire l'impact humain sur le climat. Néanmoins, la combustion de combustibles fossiles n'est pas le seul facteur. L'homme influence le climat en abattant les forêts, qui absorbent le CO_2 présent dans l'atmosphère, en permettant des fuites considérables de méthane au niveau des pipelines, et en utilisant dans l'industrie de nouveaux gaz à effet de serre synthétiques et puissants. C'est ce qui rend si difficile la résolution du problème du changement climatique. Il faut donc opérer une transformation de nos sociétés et de l'économie mondiale dans son ensemble, pour la rendre « verte » et sûre pour le climat, afin qu'elle puisse fonctionner dans l'intérêt des populations et de la planète. Les scientifiques soulignent la nécessité urgente d'une telle transformation pour avoir une chance réelle de stabiliser l'augmentation de la température à des niveaux sûrs.

QUESTIONS

1. L'effet de serre existait-il auparavant ? Quelle en a été la cause ?

2. Pourquoi la température sur Terre a-t-elle autant augmenté ces 100 dernières années ?

3. La hausse des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère est-elle due à des causes naturelles ou à l'activité humaine ? Comment cela a-t-il été démontré ?

4. Comment savons-nous que l'homme provoque à la fois le réchauffement et le refroidissement de la planète ? Lequel de ces deux effets est le plus marqué ?

5. De combien de degrés les températures ont-elles augmenté au cours des 130 dernières années ? L'augmentation enregistrée en Europe du Nord est-elle supérieure ou inférieure à celle enregistrée dans le reste du monde ?

EXERCICES

Trouvez un rondin ou une souche d'arbre proprement scié(e).

Observez les cernes annuels : vous constaterez que certains sont fins et d'autres plus larges.

Le cerne le plus ancien se trouve au centre du rondin ou de la souche, tandis que le plus récent se trouve au bord.

Les cernes larges correspondent aux années chaudes, et les cernes fins aux années froides. Comptez combien d'années, au cours des 20 dernières, ont été chaudes et combien ont été froides.

2

Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains

Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?

2 Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains

Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?

Tout dans la nature est relié. Un changement ne serait-ce qu'infime dans l'une des composantes du milieu naturel entraîne la modification de nombreuses autres composantes. Par conséquent, à mesure que la température sur la planète augmente, nous observons un grand nombre d'autres changements connexes. Le niveau des océans du monde augmente, les glaciers et le pergélisol fondent, la fréquence et la puissance des phénomènes météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, ouragans, tempêtes, inondations et sécheresses) augmentent d'année en année. De nouvelles maladies infectieuses et dangereuses et divers parasites font leur apparition dans des endroits où ils étaient jusqu'à présent inconnus. Ces effets du changement climatique, entre autres, sont dangereux pour les plantes et les animaux, qui ne peuvent s'adapter rapidement à des changements aussi radicaux. Ils entraînent également des conséquences économiques dommageables, et représentent une menace pour la santé et même la vie humaine.

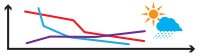
Les conclusions récemment publiées par l'ARC du GIEC indiquent que le changement climatique en cours pourrait avoir de dangereuses conséquences pour l'homme et pour le milieu naturel dans le futur. Les scientifiques ont conclu que pour chaque 0,1 °C de réchauffement de la planète, les impacts s'aggravent et les risques augmentent (Fig. 2.1). C'est pourquoi le secrétaire général des Nations Unies, António Guterres, a qualifié ce rapport de « code rouge pour l'humanité ». Mais d'autre part, chaque 0,1 °C évité peut être crucial pour limiter l'ampleur des dommages futurs.

Les risques accrus liés à la hausse des températures évalués par le GIEC (Fig. 2.2) montrent que même limiter la hausse de la température mondiale à 1,5 °C n'est pas sûr pour tous. À ce niveau de réchauffement, par exemple, 950 millions de personnes dans les zones arides du monde seront confrontées au stress hydrique, au stress thermique et à la désertification, tandis que la part de la population mondiale exposée aux inondations augmentera de 24 %.

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les effets négatifs du changement climatique sur l'environnement et les êtres humains avant la fin du XXIe, si nous ne faisons pas tout ce qui est en notre pouvoir pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

La température moyenne sur Terre a augmenté de 1,2 °C depuis la deuxième moitié du XIXe siècle. Les températures n'ont jamais été aussi élevées au cours des 1 400 dernières années. 2023 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée.



La hausse des températures modifie l'équilibre de l'ensemble des systèmes naturels sur Terre : les glaciers et le pergélisol fondent ; le niveau de l'océan mondial monte ; les inondations, sécheresses et ouragans sont plus fréquents ; les conditions météorologiques sont de plus en plus imprévisibles.

Entre 2,4 et 3 milliards de personnes
2050

D'ici 2050, entre 2,4 et 3 milliards de personnes seront touchées par des inondations et autres catastrophes naturelles causées par le changement climatique, l'accroissement de la population, la déforestation et la montée du niveau de l'océan mondial.

40% de la population mondiale

40 % de la population mondiale vit dans des régions côtières situées à moins de 100 km de la mer. Ces personnes seront particulièrement touchées par la montée du niveau de la mer, par la salinisation accrue des terres agricoles, ainsi que par des tempêtes et des inondations plus fréquentes.

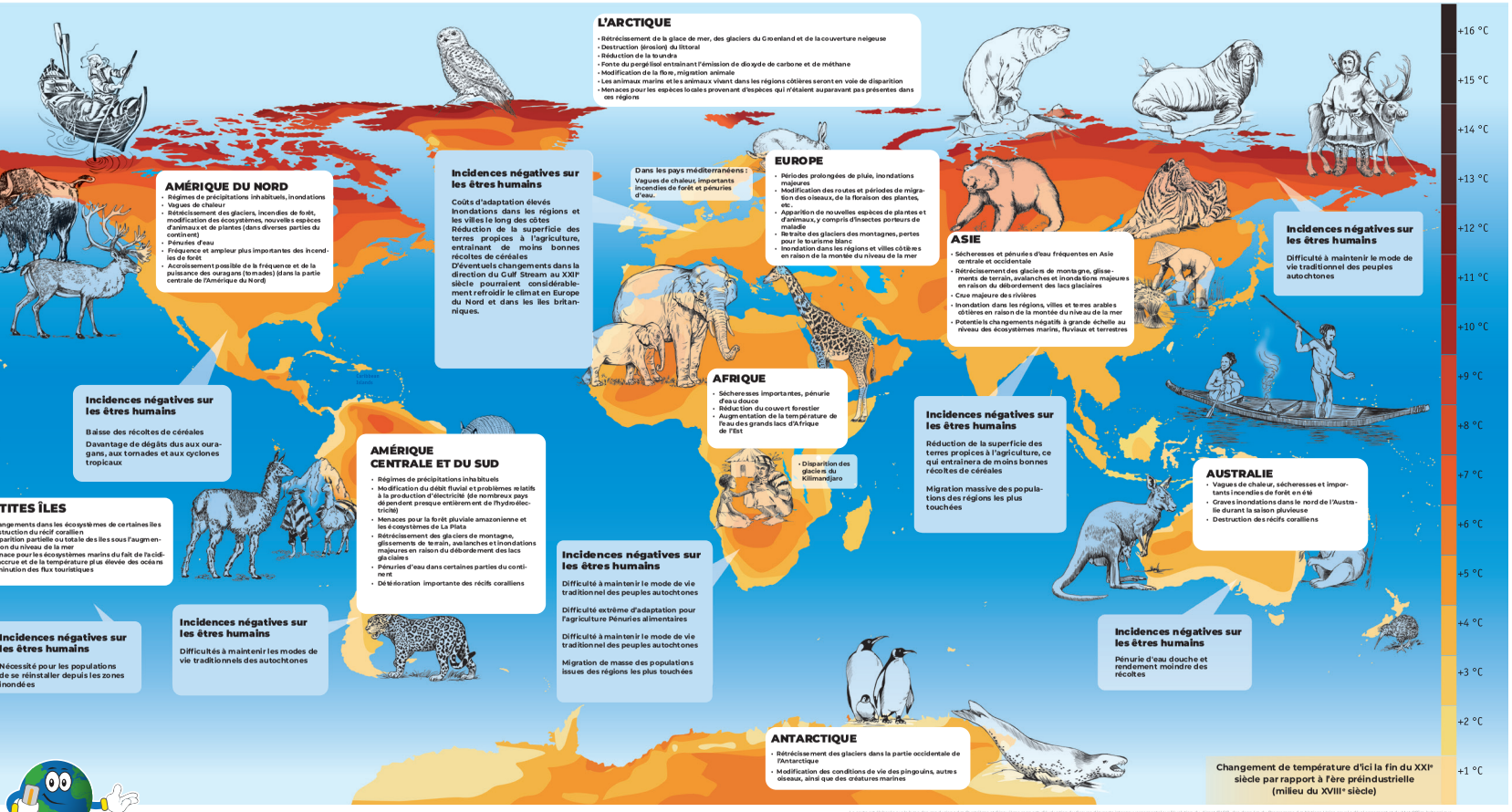
Entre 800 millions et 3 milliards

Le changement climatique accélérera la fonte des glaciers, modifiera les cycles et les quantités de précipitations, et altèrera le débit saisonnier des rivières. En conséquence, entre 800 millions et trois milliards de personnes seront confrontées à des pénuries d'eau d'ici 2080.

2 °C= 500 milliards de dollars américains en 2050 pour les mesures d'adaptation dans les pays en développement

Les coûts des mesures permettant à la population mondiale de s'adapter à une hausse de la température sur Terre de seulement 2 °C s'élèveront à près de 300 milliards de dollars américains en 2030 et atteindront environ 500 milliards en 2050, en raison du rythme accéléré du changement climatique.

La combustion de combustibles fossiles, le rapide développement des transports et la déforestation ont entraîné une augmentation record des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui ne s'est pas produit sur Terre depuis au moins 800 000 ans. Depuis la Révolution industrielle (moitié du XVIIIe siècle), les niveaux de dioxyde de carbone (CO_2) ont grimpé de 150 %, de méthane (CH_4) de 264 % et d'oxyde d'azote (N_2O) de 124 %.



La carte est élaborée sur la base des conclusions du Quatrième et Cinquième rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), des données du Programme des Nations Unies pour le développement et du Met Office britannique.

Module sur le Climat

Figure 2.1

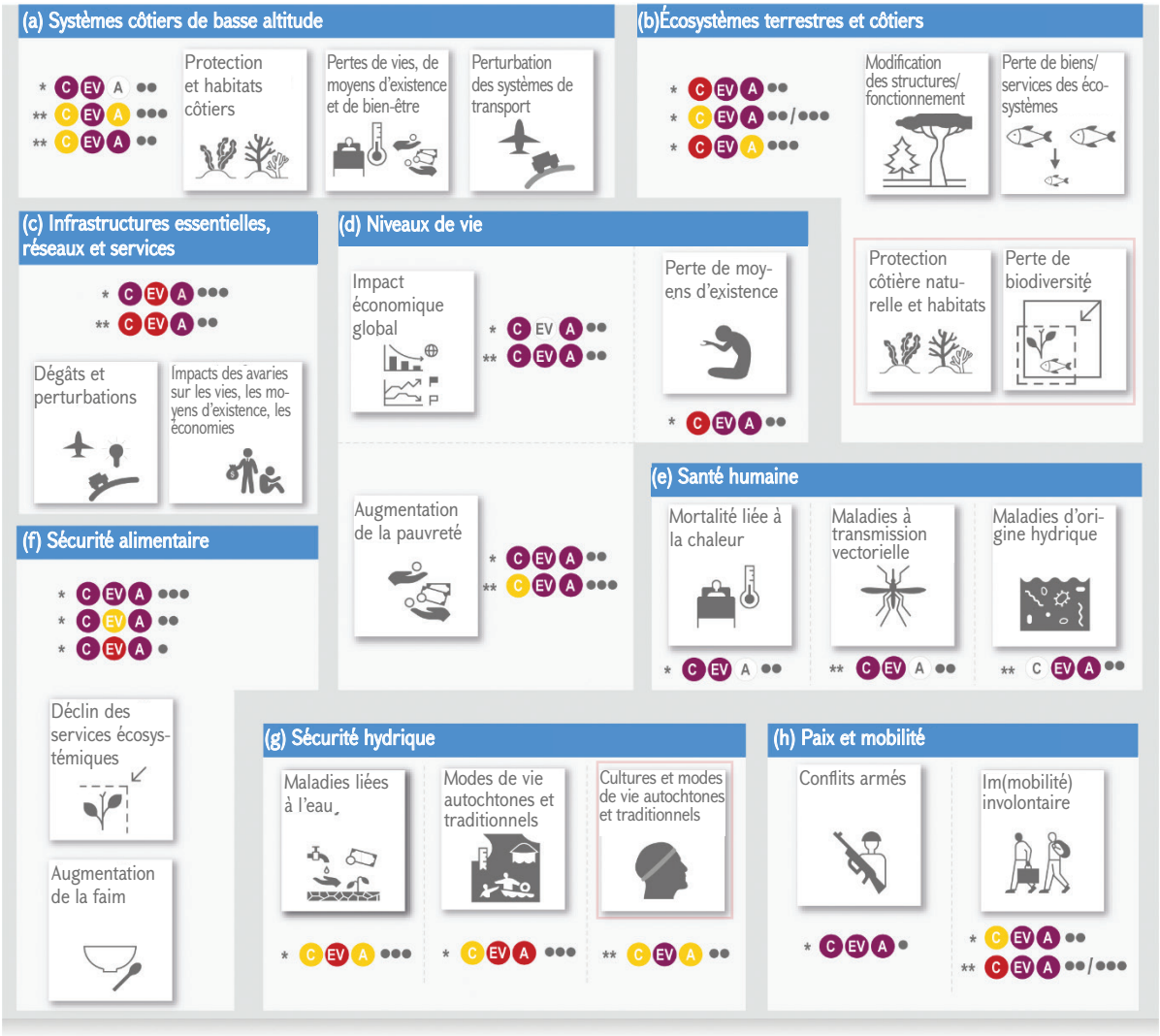
Les effets négatifs du changement climatique sur l'environnement et les êtres humains avant la fin du XXIe siècle, si nous ne faisons pas tout ce qui est en notre pouvoir pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

Figure 2.2 Comparaison des risques pour les êtres humains et les systèmes naturels à différents niveaux de température

	1,5 °C	2 °C	3 °C	1,5 °C vs 2 °C	1,5 °C vs 3 °C
PERTE DE BIODIVERSITÉ Pourcentage maximum d'espèces à haut risque d'extinction dans les forêts et les terres	14 %	18 %	29 %	1,3 FOIS PIRE	2,1 FOIS PIRE
SÉCHERESSE Population des zones arides exposée au stress hydrique, au stress thermique et à la désertification	95 000 millions DE PERSONNES	1 150 000 millions DE PERSONNES	1 290 000 millions DE PERSONNES	200 millions DE PERSONNES DE PLUS	340 millions DE PERSONNES DE PLUS
SÉCURITÉ ALIMENTAIRE Coûts des adaptations et dommages résiduels aux principales cultures	63 000 millions DE DOLLARS AMÉRICAINS	80 000 millions DE DOLLARS AMÉRICAINS	128 000 millions DE DOLLARS AMÉRICAINS	17 000 millions DE DOLLARS AMÉRICAINS EN PLUS	65 000 millions DE DOLLARS AMÉRICAINS EN PLUS
INCENDIES Augmentation des surfaces brûlées dans l'Europe méditerranéenne	De 40 à 54 %	De 62 à 87 %	De 96 à 187 %	1,6 FOIS PIRE	3 FOIS PIRE
CHALEUR EXTRÊME Augmentation du nombre de jours par an avec une température maximale de 35 °C (95 °F)	45 à 58	52 à 68	66 à 87	1,2 FOIS PIRE	1,5 FOIS PIRE
CHALEUR EXTRÊME Augmentation des vagues de chaleur annuelles en Afrique australe	2 à 4 FOIS	4 à 8 FOIS	8 à 12 FOIS	2 FOIS PIRE	3,3 FOIS PIRE
HAUSSE DU NIVEAU DE LA MER Augmentation moyenne du niveau mondial de la mer d'ici 2100	0,28 à 0,55 m	0,33 à 0,61 m	0,44 à 0,76 m	1,1 FOIS PIRE	1,4 FOIS PIRE
INONDATIONS Augmentation de la population mondiale exposée aux inondations	24 %	30 %	AUCUNE DONNÉE DISPONIBLE	1,3 FOIS PIRE	AUCUNE DONNÉE DISPONIBLE
RÉCIFS CORALLIENS Détérioration accrue des récifs coralliens	70 à 90 %	99 %	AUCUNE DONNÉE DISPONIBLE	1,2 veces PEOR	AUCUNE DONNÉE DISPONIBLE

Le changement climatique actuel réduira réellement la productivité agricole, limitera la disponibilité de l'eau douce, augmentera la gravité des sécheresses, des vagues de chaleur et des cyclones tropicaux, et remodèlera les environnements côtiers à une vitesse et à une échelle qui pourraient provoquer des réponses sociétales déstabilisatrices. L'OMM a établi que quatre indicateurs clés du changement climatique – les concentrations de gaz à effet de serre, l'élévation du niveau de la mer, la chaleur des océans et leur acidification – ont établi de nouveaux records en 2022. C'est un autre signe clair que les activités humaines provoquent des changements à l'échelle planétaire sur terre, dans les océans et dans l'atmosphère, avec des ramifications dramatiques et durables. Si nous ne faisons pas tout notre possible pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les impacts négatifs du changement climatique sur l'environnement et les êtres humains pourraient bien être irréversibles d'ici la fin du XXIe siècle (Fig. 2.3).

Figure 2.3 **Principaux risques pour les systèmes naturels et humains découlant du changement climatique d'ici la fin du siècle**



Les expériences suggèrent que l'étude de la résistance des populations passées aux changements et anomalies climatiques pourrait fournir des informations clés sur des solutions précieuses sur la manière de faire face au changement climatique aujourd'hui et à l'avenir. Pour réduire les dommages causés par le changement climatique, l'humanité doit prendre des mesures appropriées, notamment en renforçant sa résistance face au réchauffement d'origine humaine, déjà ancré dans la crise climatique actuelle. Les preuves des impacts jusqu'à présent et des risques projetés montrent qu'une action mondiale en faveur d'un développement résilient au changement climatique est plus urgente que jamais.

Des mesures d'adaptation réalisables et efficaces sont présentées pour chacun des thèmes abordés dans ce chapitre. Elles comprennent des mesures susceptibles de réduire les risques, telles que la prise en compte des impacts et des risques du changement climatique dans la conception et la planification des établissements et des infrastructures urbains et ruraux. Elles incluent également des mesures qui peuvent contribuer à sauvegarder la biodiversité et les écosystèmes qui sont essentiels à un développement résilient au changement climatique, compte tenu des menaces que le changement climatique fait peser sur eux et de leur rôle dans l'adaptation et l'atténuation (Fig. 2.4).

Même si nous ressentons tous déjà les impacts du changement climatique, ceux-ci touchent davantage les communautés les plus pauvres et historiquement marginalisées. Les scientifiques ont noté dans le rapport AR6 du GIEC qu'aujourd'hui, entre 3,3 et 3,6 milliards de personnes vivent dans des pays très vulnérables aux impacts climatiques, principalement dans l'Arctique, en Amérique centrale et du Sud, dans les petits États insulaires en développement, en Asie du Sud et dans une grande partie de l'Afrique subsaharienne. Les impacts du changement climatique exacerbent les inégalités, les conflits et les problèmes de développement existants (par exemple, la pauvreté et l'accès limité aux services de base comme l'eau potable) dans de nombreux pays de ces régions, et limitent la capacité d'adaptation des communautés. Par exemple, de 2010 à 2020, la mortalité due aux tempêtes, aux inondations et aux sécheresses était 15 fois plus élevée dans les pays très vulnérables au changement climatique que dans ceux où cette vulnérabilité était très faible.

Cette section étudie les impacts du changement climatique sur diverses régions, sociétés et activités économiques, et présente des exemples de mesures d'adaptation climatique qui aident à atténuer et à se préparer à certains impacts climatiques négatifs inévitables.

Dangers, risques, impacts, résistance et adaptation liés au changement climatique

Actuellement, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) utilise le terme résilience désigner la capacité des systèmes humains et naturels couplés « à faire face à un événement dangereux, à une tendance ou à une perturbation, en répondant ou en se réorganisant de manière à maintenir leur fonction, leur identité et leur nature essentielles ».

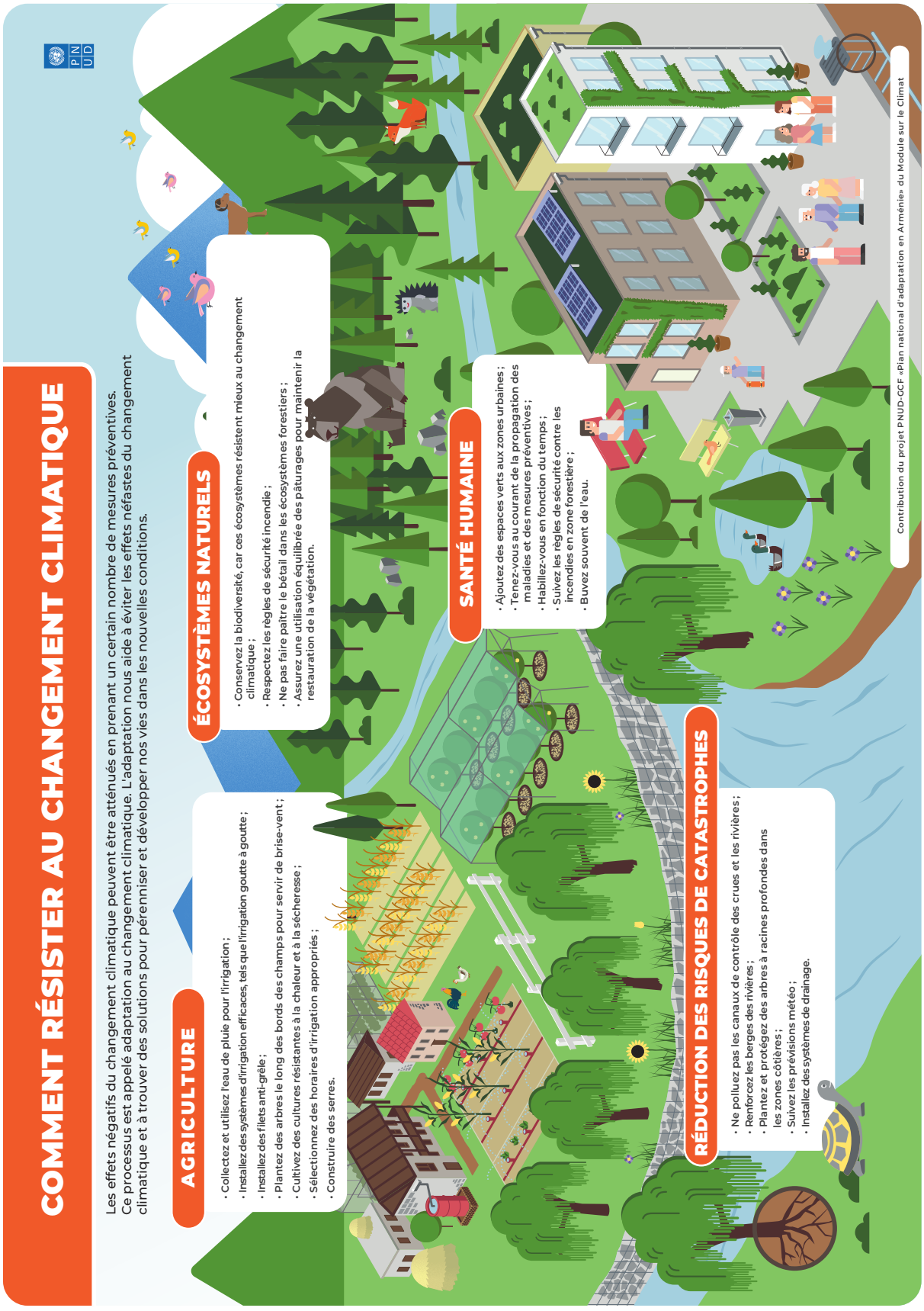
Elle englobe donc **l'adaptation**, que le GIEC définit comme le processus d'ajustement au climat réel ou attendu et à ses effets, pour modérer les dommages ou exploiter les opportunités bénéfiques. Par exemple, les mesures d'adaptation pourraient inclure la construction de bâtiments plus résistants aux événements météorologiques extrêmes, la construction de barrages pour lutter contre les inondations, le développement de nouvelles variétés de cultures résistantes à la sécheresse, etc.

Le GIEC utilise également largement le concept de risque en relation avec les conséquences néfastes potentielles du changement climatique sur les systèmes humains ou écologiques, reconnaissant la diversité des valeurs et des objectifs associés à ces systèmes. Dans le contexte du changement climatique, les risques peuvent découler des impacts potentiels du changement climatique ainsi que des réponses humaines au changement climatique.

Les conséquences des risques réalisés liés au changement climatique sur les systèmes naturels et humains définissent les impacts. Les **impacts** font généralement référence aux effets sur la vie, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les écosystèmes et les espèces, les biens économiques, sociaux et culturels, les services (y compris les services écosystémiques) et les infrastructures.

Les **dangers** sont définis comme les impacts négatifs d'événements ou de tendances physiques naturels ou d'origine humaine qui peuvent entraîner des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres impacts sur la santé, ainsi que des dommages et des pertes de biens, d'infrastructures, de moyens de subsistance, de fourniture de services, d'écosystèmes et de ressources environnementales.

Figure 2.4 Comment s'adapter au changement climatique et renforcer la résistance



2.1 Quelle est l'incidence du climat sur le temps

Les scientifiques ont constaté qu'au cours des 50 dernières années, les phénomènes météorologiques sont devenus beaucoup plus extrêmes de par le monde. Nous entendons régulièrement parler aux informations d'une nouvelle catastrophe naturelle : un ouragan dévastateur aux Philippines, une sécheresse sans précédent en Australie, de graves inondations en Europe, des incendies de forêt excessifs dus à des vagues de chaleur et des sécheresses prolongées au Canada, en Grèce et à Hawaï, et des chutes de neige au Caire et à Alexandrie pour la première fois en un siècle. Chaque jour, les températures battent de nouveaux records : en Europe, nous sommes confrontés à des étés exceptionnellement chauds, alors qu'en hiver les températures peuvent subitement passer de zéro à moins vingt.

Ces perturbations météorologiques anormales sont qualifiées par les scientifiques d'anomalies météorologiques. Par exemple, des périodes anormalement froides en été ou un redoux persistant en hiver sont les anomalies météorologiques les plus courantes dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord. Lorsque les anomalies météorologiques représentent une menace pour la santé, la vie et l'activité économique des populations, on parle de **phénomènes météorologiques extrêmes**.

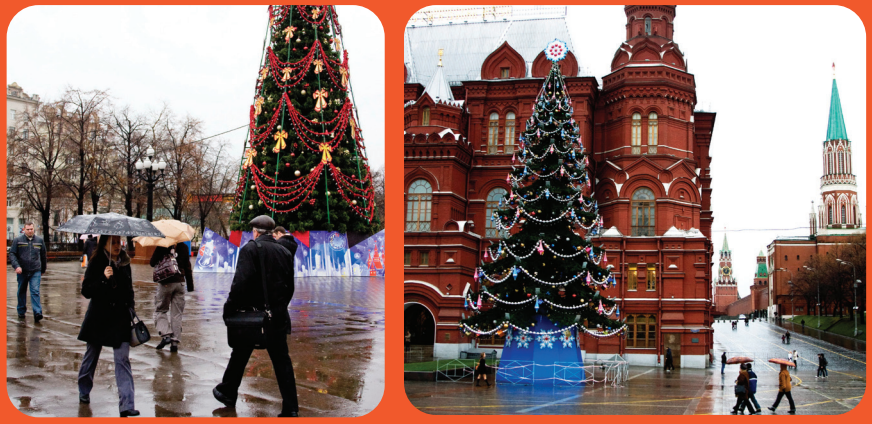
Les anomalies météorologiques désignent toute perturbation météorologique différente des conditions météorologiques « habituelles » au cours d'une saison, d'un mois ou d'un jour donné(e), le terme « habituelles » correspondant aux conditions météorologiques moyennes relevées dans cette région durant une période passée déterminée, généralement entre 1961 et 1990.

Les phénomènes météorologiques extrêmes sont des processus et événements associés aux conditions météorologiques survenant au niveau de l'atmosphère, à l'intérieur des terres ou en mer, et dont les effets peuvent entraîner la destruction de peuples, d'animaux et de plantes, et causer un grave préjudice à l'économie.

Les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent être les suivants : période prolongée de chaleur ou période de froid extrême, vents particulièrement violents, ouragans, tempêtes tropicales (typhons), tempêtes de poussière, fortes précipitations, fortes chutes de neige, tornades, inondations, sécheresses, avalanches, glissements de terrain et bien d'autres.

Remarque : les tremblements de terre, les éruptions volcaniques et les tsunamis ne sont pas climato-dépendants et ne sont donc pas des phénomènes MÉTÉOROLOGIQUES !

Figure 2.1.1 **La pluie en décembre, plutôt que la neige, n'est plus un phénomène rare à Moscou.**



Graves tempêtes de sable et de poussière au Moyen-Orient en 2022

Les graves tempêtes de sable et de poussière sont définies comme des tempêtes provoquées par des vents intenses sur des zones de sol aride qui ramassent de grandes quantités de matières broyées dans l'atmosphère. Environ deux tonnes de sable et de poussière sont rejetées dans l'atmosphère chaque année, selon la Coalition des Nations Unies pour lutter contre la désertification. Les tempêtes de poussière ou de sable se produisent plus fréquemment dans les déserts et les régions où le sol est sec. Au Moyen-Orient et dans les autres régions arides, elles peuvent se présenter sous deux formes. Les « haboobs » (mot arabe signifiant « vent violent ») proviennent des fronts de tempêtes et apparaissent souvent sous la forme de murs de sable et de poussière fonçant droit devant. Mais tous comme les orages, les haboobs ne durent pas longtemps. Il y a ensuite les longues tempêtes de poussières, de grande envergure, qui peuvent durer des jours. En Irak, ces tempêtes sont souvent associées à des vents persistants de nord-ouest, appelés « shamal » (mot arabe signifiant « Nord »). La construction de nouveaux barrages, la mauvaise gestion de l'eau, la sécheresse extrême, la désertification et d'autres facteurs contribuent tous à ce phénomène cauchemardesque.

En avril et juin 2022, l'Irak et d'autres pays du golfe Persique contemplaient un ciel orange apocalyptique avec d'intenses tempêtes de sable et de poussière. Des fermetures de ports, d'aéroports, de routes et d'écoles ainsi que des annulations de vols ont été signalées. La tempête a entraîné l'hospitalisation de milliers de personnes pour cause de problèmes respiratoires. Les tempêtes de poussière peuvent être particulièrement dangereuses pour les personnes asthmatiques ; en outre, elles peuvent transporter des microbes pathogènes. Les tempêtes de poussière entraînent également une destruction des sols et notamment de ses particules à haute teneur en nutriments les plus légères, réduisant du même coup sa productivité.

Ces dernières années, les tempêtes de poussière sont devenues de plus en plus courantes au Moyen-Orient et dans d'autres parties arides du monde, comme l'Afrique du Nord, le nord de la Chine, la Mongolie et le Kazakhstan, l'Australie, ainsi que le centre des États-Unis. En Mauritanie, où le désert du Sahara couvre 90 % du territoire, il n'y avait que deux tempêtes de poussière par an au début des années 1960, mais il y en a près de 80 par an à l'heure actuelle, selon les experts de l'Université d'Oxford.

Selon les scientifiques, les tempêtes de poussière plus fréquentes sont le fruit de mauvaises pratiques agricoles, notamment d'un surpatûrage et d'une destruction de la croûte biologique, ainsi que de la hausse des températures locales et mondiales et des sécheresses. Il est désormais établi que les tempêtes de sable et de poussière sont un phénomène mondial qui affecte nos économies, notre santé et notre environnement, et pas seulement dans les zones arides. Ce phénomène touche tout le monde – hommes, femmes, garçons et filles – mais pas tous de la même manière. Les différences proviennent des rôles sexospécifiques dans les sphères productive, économique, familiale et sociale. De plus, les tempêtes de sable et de poussière peuvent s'avérer mortelles pour les personnes souffrant de problèmes de santé. Elles sont directement liées à la dégradation des terres et peuvent être résolues grâce à une gestion durable des terres et en neutralisant la dégradation des terres.

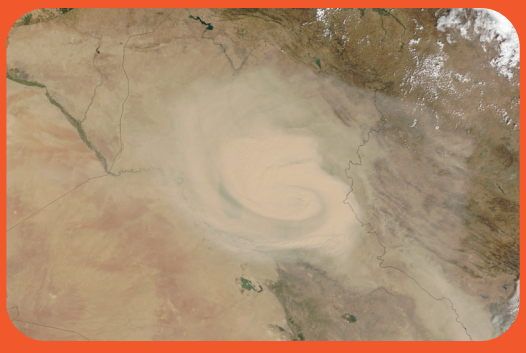
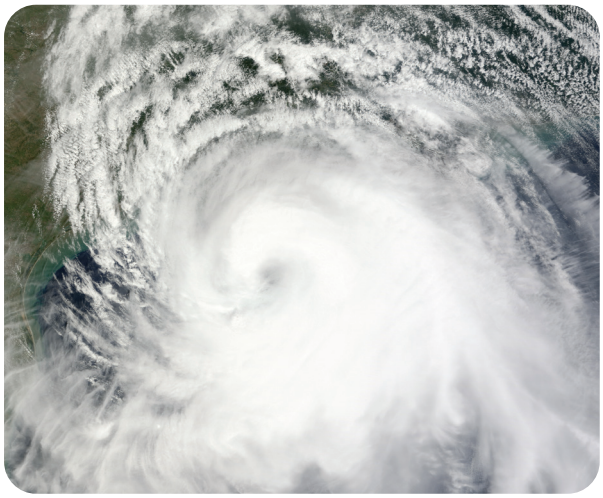


Figure 2.1.2

Image satellite d'une tempête de poussière sur l'Irak, le 7 et le 9 avril 2022

Qu'est-ce qui bouleverse les conditions météorologiques et en quoi le changement climatique a-t-il à voir avec cela ?

Certaines observations suggèrent que le nombre de situations météorologiques étranges et de phénomènes météorologiques extrêmes ne cesse d'augmenter aux quatre coins du monde. Les scientifiques pensent que cela peut être lié au changement climatique mondial. À mesure que la température moyenne sur la planète augmente, l'évaporation de l'eau des océans, des lacs et des rivières fait de même. En conséquence, le taux d'humidité dans l'atmosphère augmente, entrainant de fortes précipitations dans certaines régions. De même, la hausse des températures des eaux à la surface des océans entraîne une augmentation du nombre de tempêtes tropicales particulièrement dangereuses (typhons), qui sont bien plus nombreuses qu'au milieu du siècle dernier.



Comme prévisible, le réchauffement climatique entraîne également des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes.

UNE VAGUE DE CHALEUR
est une période d'au moins cinq jours, durant laquelle la température quotidienne moyenne est au moins 5 °C supérieure aux normales saisonnières.

Une récente étude publiée dans le magazine Nature indique que les chaleurs extrêmes qui ne se produisaient auparavant qu'une fois tous les 1 000 jours, surviennent désormais tous les 200 ou 250 jours. Cependant, les effets du réchauffement varieront d'une région du monde à l'autre. Selon cette étude, les phénomènes météorologiques au niveau de l'équateur deviendront plus extrêmes, ce qui signifie que les pays tropicaux déjà aux prises avec une infrastructure fragile et avec la pauvreté, connaîtront 50 fois plus de jours de chaleur extrême et 2,5 fois plus de jours de précipitations. Toutefois, certaines régions sèches, notamment certaines parties de la Méditerranée, l'Afrique du Nord, le Chili, le Moyen-Orient et l'Australie, seront exposées à des risques plus élevés de sécheresse et de pénurie d'eau douce.

Une autre étude parue dans le même numéro du magazine conclut que nous entrons désormais dans une ère de chaleur extrême qui ne se serait tout simplement pas produite sans le changement climatique. À l'aide d'une analyse d'attribution d'événements qui relie les événements réels au changement climatique, elle montre que les conditions de vagues de chaleur prolongées en Sibérie et en Australie en 2020 auraient été pratiquement impossibles sans le changement climatique. La canicule sibérienne a provoqué des incendies de forêt massifs (libérant environ 56 millions de tonnes de CO_2 dans l'atmosphère) et un effondrement des infrastructures dû à la fonte du permafrost, conduisant à la déclaration de l'état d'urgence. L'état d'urgence a également été déclaré pour les feux de brousse australiens, associés à la chaleur estivale exceptionnelle de fin 2019 à février 2020, également connue sous le nom d'été noir.

Les scientifiques qui ont analysé les records observés au cours de l'hiver et du printemps 2023 dans l'hémisphère sud ont conclu que le changement climatique a rendu ces températures cent fois plus probables.

Mais il est important de garder à l'esprit que des conditions météorologiques inhabituelles ne sont pas synonymes de changement climatique. Par exemple, un hiver très froid ne signifie pas nécessairement que le climat est devenu plus frais. Les données doivent être collectées sur une longue période (environ dix ans ou plus) avant de pouvoir attribuer les changements au changement climatique.

Les anomalies météorologiques peuvent infliger d'importants dommages à l'économie mondiale et entraîner la perte de vies humaines.

Exemples de phénomènes météorologiques extrêmes au cours de ces dernières années

Le 13 septembre 2023, des pluies torrentielles provoquées par la tempête Daniel ont balayé plusieurs régions de l'est de la Libye. La ville portuaire de Derna a été la plus durement touchée, avec des quartiers entiers emportés par l'effondrement de deux structures vieillissantes, créant une situation catastrophique. Le bureau de l'Organisation internationale pour les migrations en Libye a déclaré qu'au moins 30 000 personnes avaient été déplacées et que le nombre de morts s'est rapidement élevé à au moins 11 300.

L'une des principales raisons du nombre élevé de pertes en vies humaines était le manque de surveillance du barrage ou d'ordres d'évacuation malgré la trajectoire connue de la tempête Daniel. Le manque de capacité de l'État à coordonner les efforts de secours en cas de catastrophe a aggravé l'impact humain.

La catastrophe en Libye fait suite à une série d'inondations meurtrières dans le monde en septembre 2023, de la Chine au Brésil en passant par la Grèce.

Les cyclones tropicaux qui frappent des pays sous-développés et mal préparés comme le Myanmar, le Bangladesh, l'Inde, les Philippines et le Honduras ont également fait de très nombreux morts dans le passé. Les nations qui ne disposent pas des ressources et de la stabilité politique nécessaires pour se préparer adéquatement aux catastrophes naturelles subissent des dommages aux conséquences énormes sur les populations et l'économie.

Figure 2.1.3 **La ville de Derna, Libye, le mercredi 13 septembre 2023. Les inondations provoquées par des pluies torrentielles ont tué des milliers de personnes et emporté des quartiers entiers dans la mer**

Événements météorologiques extrêmes en Afrique en 2023

Alors que les inondations en Libye en 2023 ont fait la une des journaux mondiaux en raison de l'ampleur du nombre de morts, de nombreux autres événements extrêmes meurtriers en Afrique n'ont pas fait la une de l'actualité internationale. Une analyse de toutes les données sur les catastrophes, des rapports humanitaires et des actualités locales par le groupe de réflexion Carbon Brief a contribué à créer une image plus complète de l'ampleur des impacts météorologiques extrêmes en Afrique en 2023 à ce jour.

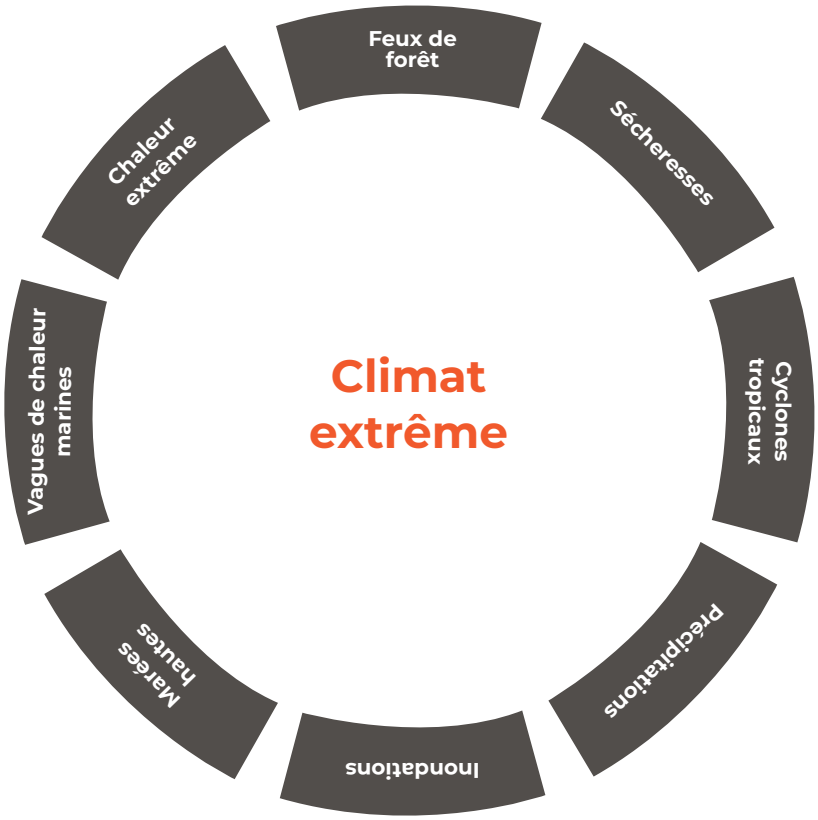
Elle montre qu'au moins 15 700 personnes ont été tuées dans des catastrophes météorologiques extrêmes en Afrique en 2023 et que 34 millions ont été touchées par des phénomènes extrêmes :

- Plus de 3 000 personnes ont été tuées dans des crues soudaines en République démocratique du Congo et au Rwanda en mai. Les scientifiques n'ont pas été en mesure d'évaluer le rôle du changement climatique dans la catastrophe en raison du manque de stations météorologiques opérationnelles enregistrant des données dans la région.
- Au moins 860 personnes ont été tuées dans des inondations et des coulées de boue en février lors du cyclone tropical Freddy, le cyclone le plus long jamais enregistré affectant Madagascar, le Mozambique, Maurice, le Malawi, la Réunion et le Zimbabwe.
- Plus de 29 millions de personnes continuent de faire face à des conditions de sécheresse persistantes en Éthiopie, en Somalie, au Kenya, à Djibouti, en Mauritanie et au Niger.
- Les pays d'Afrique australe ont été étouffés par une vague de chaleur hivernale qui a duré plusieurs mois, laissant beaucoup d'entre eux confrontés à des conditions semblables à celles de l'été pendant une année continue.

En examinant tous les événements extrêmes récents et en se basant sur des données récentes, l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace des États-Unis (NASA) a confirmé qu'à mesure que le climat de la Terre change, il entraîne des conditions météorologiques extrêmes sur toute la planète. Les vagues de chaleur record sur terre et dans l'océan, les pluies torrentielles, les inondations graves, les sécheresses qui durent des années, les incendies de forêt extrêmes et les inondations généralisées provoquées par les ouragans deviennent tous plus fréquents et plus intenses. Les missions satellitaires de la NASA, notamment l'Observatoire du système terrestre, fournissent des données vitales pour surveiller et réagir aux événements météorologiques extrêmes, avec des explications pour chacun d'eux (Fig. 2.1.4).

Figure 2.1.4

Le graphique rotatif résume la façon dont le changement climatique influence les conditions météorologiques extrêmes à travers la planète, entraînant des températures extrêmes, des incendies de forêt, des sécheresses, des cyclones tropicaux, de fortes précipitations, des inondations, des inondations à marée haute et des vagues de chaleur marines



Chaleurs extrêmes : Depuis 1950, la fréquence et l'intensité des chaleurs extrêmes ont augmenté principalement en raison des émissions humaines de gaz à effet de serre. Cela inclut des températures élevées et des vagues de chaleur dangereuses. Ces événements deviendront encore plus graves et fréquents à mesure que la planète se réchauffe.

Feux de forêt : Les conditions chaudes et sèches augmentent le risque d'incendies de forêt. Agissant comme combustible, la végétation sèche permet aux incendies de continuer à brûler une fois allumés. Alors que les températures continuent d'augmenter à l'échelle mondiale, les incendies de forêt pourraient devenir plus fréquents et plus intenses dans certaines régions, menaçant des vies et des biens.

Sécheresses : à mesure que la planète se réchauffe, certaines zones sèches deviennent de plus en plus sèches. Des températures plus chaudes entraînent une plus grande évaporation de l'eau de la surface, la transformant en vapeur d'eau dans l'air. Puisque l'air plus chaud peut retenir plus de vapeur d'eau, cela crée un cycle qui conduit à un réchauffement plus important et à une évaporation encore plus importante. Avec moins d'humidité en surface, des sécheresses de plus en plus fréquentes et graves se produisent.

Cyclones tropicaux : Avec un océan plus chaud et plus d'humidité dans l'air, les cyclones tropicaux peuvent produire des précipitations plus intenses et plus soutenues. Les ouragans, les typhons et les cyclones tropicaux augmentent également les risques d'inondations côtières, car la montée des eaux entraîne des ondes de tempête plus importantes. De plus, les tempêtes qui se forment ont plus de chances de s'intensifier rapidement.

Fortes précipitations : à mesure que la température de la Terre augmente, l'atmosphère plus chaude peut retenir plus de vapeur d'eau, fournissant ainsi plus d'eau pour les pluies intenses, les chutes de neige et autres précipitations dues aux tempêtes. Les fortes précipitations se produisent déjà plus souvent et deviendront plus fréquentes et plus intenses avec l'augmentation des températures mondiales.

Inondations : L'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère signifie que certaines zones humides deviendront plus humides. Les précipitations extrêmes peuvent dépasser la capacité des systèmes de drainage naturels et artificiels, entraînant des inondations dévastatrices. La montée du niveau de la mer aggravera également les inondations près des côtes.

Inondations à marée haute : à mesure que les températures mondiales augmentent, le réchauffement des océans et la fonte des glaces terrestres entraînent une élévation du niveau de la mer. Cela signifie que les marées hautes deviendront plus hautes, ce qui entraînera un plus grand risque d'inondation même par temps ensoleillé. Cela se produit déjà dans certaines villes côtières comme Miami et Bangkok.

Vagues de chaleur marines : Le réchauffement climatique peut entraîner des vagues de chaleur extrêmes au sein des océans. Les coraux et autres espèces marines ne sont pas nécessairement adaptés à ces températures plus élevées et peuvent mourir lors de vagues de chaleur de plusieurs jours. Tout comme sur terre, les vagues de chaleur marines devraient devenir plus fréquentes et plus intenses à mesure que la Terre se réchauffe.

Impacts combinés : bon nombre de ces événements météorologiques extrêmes se produisent en combinaison avec d'autres. Dans certaines régions, les vagues de chaleur et les sécheresses se produisent plus souvent ensemble, une tendance susceptible de se poursuivre à mesure que la planète se réchauffe. Il en va de même pour les inondations, car les fortes précipitations dues aux tempêtes et à la montée des eaux augmenteront les dommages potentiels le long des côtes.

Pouvons-nous prédire les phénomènes météorologiques extrêmes ?

Malheureusement, dans la plupart des cas il est impossible de prédire les phénomènes météorologiques extrêmes. L'échelle des prévisions météorologiques est au maximum 14 jours, l'atmosphère changeant complètement toutes les deux semaines et les flux d'air ne pouvant être observés plus longtemps. Le mieux que l'on puisse prédire, par exemple, est que « l'hiver sera un degré plus froid que les normales de saison ».

Les prévisions à court terme sont plus précises. Les prévisions météorologiques du lendemain, fournies par les services météorologiques européens, sont fiables à 96 %, les prévisions du surlendemain le sont à 93 %, et les prévisions à trois jours le sont à 90 %. Actuellement, les alertes météorologiques à long terme ne sont possibles que de manière très générale. À titre d'exemple, on peut prédire que les températures extrêmement élevées actuellement enregistrées tous les 20 ans dans le nord de l'Eurasie, seront trois fois plus fréquentes (une fois tous les 7 ans) d'ici le milieu du XXIe siècle, et que d'ici la fin du siècle, elles pourraient se répéter tous les 3 à 5 ans, jusqu'à devenir un phénomène presque courant.

Devons-nous croire aux dictons météorologiques ?

Les dictons météorologiques sont des expressions folkloriques portant sur les prévisions météorologiques. Malgré leur popularité, ils sont absolument inutiles en matière de prévisions météorologiques. Même à l'époque de nos grands-parents, les moyens classiques de prédiction de la météo échouaient souvent, et de nos jours les dictons météorologiques ont complètement perdu leur corrélation avec les lieux précis auxquels ils s'appliquaient. Par exemple, il existe un dicton anglais qui dit : « Ash leaf before the oak, then we will have a summer soak ; oak leaf before the ash, the summer comes without a splash » (feuille de frêne avant le chêne, l'été sera humide ; feuille de chêne avant le frêne, l'été sera sec). Cela était généralement vrai pour certaines parties de la Grande Bretagne. Mais les gens ont commencé à se déplacer dans le pays, et même à l'étranger, et ont emporté ce dicton avec eux. Il en a résulté une certaine confusion et le dicton a perdu de sa pertinence.

Qu'allons-nous faire ? Comment pouvons-nous faire face aux phénomènes météorologiques extrêmes ? Pouvons-nous nous y adapter ?

Les Nations Unies ont recommandé les systèmes d'alerte précoce comme éléments clés de l'adaptation au changement climatique et de la gestion des risques climatiques, en particulier pour les événements météorologiques extrêmes et l'élévation du niveau de la mer. De tels systèmes peuvent aider les communautés vivant dans les zones côtières, le long des zones inondables et dépendantes de l'agriculture, à faire face aux inondations et aux cyclones et ainsi à réduire leur vulnérabilité aux événements extrêmes. Le secrétaire général des Nations Unies, António Guterres, a demandé que chaque habitant de la planète soit protégé par des systèmes d'alerte précoce d'ici 2027. Il a lancé l'Initiative d'alerte précoce pour tous (EW4All) en novembre 2022 lors de la Conférence sur le changement climatique (COP27) à Sharm El-Cheikh, Égypte. Les Nations Unies ont également lancé un partenariat, Climate Risk and Early Warning Systems, pour aider les pays à haut risque dont les systèmes d'alerte sont négligés à les développer. De même, l'OMS recommande des systèmes d'alerte précoce pour prévenir l'augmentation de la morbidité et des épidémies liées aux vagues de chaleur

Ouragan Irma à Antigua-et-Barbuda en 2017

Il existe plusieurs bonnes pratiques pour réduire les dégâts et les impacts dévastateurs des tempêtes et des ouragans. À Barbuda, l'ouragan Irma a fait des ravages en 2017, entraînant d'énormes pertes matérielles et l'évacuation des 2 000 habitants de l'île des Caraïbes vers Antigua voisine. Avec une aide financière de 10 millions de dollars du Fonds mondial d'adaptation, Antigua-et-Barbuda met en œuvre un projet d'adaptation au changement climatique depuis 2017. Le projet est conçu pour aider les communautés les plus vulnérables du bassin versant côtier de McKinnon à renforcer leur résistance contre les inondations, les ouragans, et des températures plus élevées en adoptant une approche intégrée. Les mesures comprennent la restauration des canaux de drainage naturels et la protection des maisons vulnérables et des abris anti-tempête contre le changement climatique afin de réduire les risques d'inondation et de catastrophe :

- Restauration des canaux de drainage naturels : en nettoyant, élargissant et approfondissant les canaux de drainage, les bassins de rétention et les ponceaux à leur taille naturelle, cette mesure vise à renforcer la capacité à faire face aux précipitations et tempêtes extrêmes.
- Protection des logements vulnérables face au climat : en donnant accès à un programme innovant de prêts renouvelables à faible taux d'intérêt, cette mesure permettant aux ménages vulnérables de protéger leur logement contre le climat.
- Abris contre les tempêtes pour réduire les risques d'inondations et de catastrophes : en soutenant des groupes communautaires dans des zones défavorisées avec des subventions, cette mesure visait à développer des bâtiments résilients au climat pour servir d'abris contre les tempêtes. Le projet a également renforcé la collaboration avec d'autres fonds tels que le Fonds spécial pour le changement climatique du Fonds pour l'environnement mondial en entreprenant une étude hydrologique avec leur soutien et en offrant la possibilité de l'étendre.

Source : www.adaptation-fund.org.

Nul besoin d'être scientifique ou climatologue, ou même de travailler pour les services d'urgence, pour répondre à ces questions. La réponse est très simple : « Commencez par vous-même ». Soyez attentif et montrez-vous prudent. Être attentif est assez simple : tenez-vous au courant des dernières actualités scientifiques ; n'ignorez pas les appels à tenir compte du changement climatique si vous participez à des projets à long terme (par exemple, la construction d'une nouvelle voie ferroviaire dans la région du pergélisol devrait tenir compte de l'augmentation de la fonte du pergélisol). Être prudent est plus complexe : nous devons adopter des comportements plus prudents, modifier nos habitudes ; par exemple, nous devons apprendre à économiser de l'énergie. Il serait très utile de savoir comment se comporter en cas de situation météorologique extrême. Par exemple, être en mesure de prodiguer les premiers soins aux personnes ayant perdu connaissance en raison de la chaleur.

Règles de sécurité à observer en cas d'ouragan, de tempête ou de tornade

En cas d'alerte tempête :

- fermez les portes, les fenêtres, les trappes d'accès aux combles et les aérations
- retirez des rebords de fenêtres, des balcons et des loggias, les objets qui pourraient être emportés par le vent
- coupez le gaz et l'électricité, éteignez les fourneaux et les feux de cheminée
- préparez des stocks de nourriture et d'eau potable
- assurez-vous de conserver avec vous l'ensemble des choses et documents essentiels
- abritez-vous au sous-sol ou sous une structure solide.

En cas d'ouragan, de tempête ou de tornade imprévue :

a) si vous êtes chez vous :

- éloignez-vous des fenêtres
- restez chez vous et abritez-vous dans un endroit sûr (au sous-sol ou au rez-de-chaussée idéalement)

b) Si vous êtes à l'extérieur :

- abritez-vous dans un passage souterrain, une boutique ou sous le porche d'un immeuble
- trouvez un abri naturel (un ravin, un puits, un fossé, etc.), allez aussi loin que possible et allongez-vous sur le sol
- éloignez-vous des panneaux, arrêts de bus, arbres, piliers de ponts, lignes électriques
- ne touchez en aucun cas les fils électriques arrachés par le vent.

Ne quittez pas immédiatement votre abri une fois le phénomène météorologique extrême passé, d'autres vents violents pouvant faire soudainement leur apparition.

QUESTIONS

1. Est-il plus dur de prédire le temps pour une zone urbaine ou une zone rurale ? Pourquoi ?

2. Imaginez que votre famille souhaite célébrer le Nouvel An à l'extérieur. Ce que vous ferez dépendra des conditions météorologiques : vous devrez peut-être rester chez vous si le temps est trop mauvais. Quelle est la date la plus proche à laquelle vous serez en mesure de prédire le temps du 31 décembre, du moins grossièrement ?

3. Pourquoi les conditions météorologiques extrêmes représentent-elles un danger pour les gens ?

4. Un tremblement de terre est-il un phénomène météorologique extrême ?

5. Les phénomènes météorologiques extrêmes auxquels nous sommes confrontés de nos jours (vents violents, inondations, vagues de chaleur, etc.) se produisaient-ils déjà par le passé ?

6. Quels types de mesures d'adaptation sont recommandés pour faire face aux impacts climatiques des conditions météorologiques extrêmes ?

EXERCICE

Demandez à votre professeur de géographie quelles sont les principales caractéristiques climatiques de votre lieu de résidence.

Comment était l'été : était-il plus chaud ou plus doux que d'habitude ?

2.2 Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux

Qu'est-ce que la biodiversité ?

BIODIVERSITÉ

LA BIODIVERSITÉ regroupe l'ensemble des différentes espèces de plantes et d'animaux, de champignons et de micro-organismes, ainsi que les nombreuses combinaisons d'environnements (paysages) et le grand nombre de variantes génétiques d'organismes similaires. En d'autres termes, la biodiversité est la multiplicité des formes et manifestations de la vie sur Terre.

Les scientifiques distinguent **trois grands types de biodiversité** :

- génétique (entre organismes d'une même espèce) ;
- les espèces (entre tous les êtres vivants de la planète) ;
- paysage ou écosystème (entre toutes les combinaisons de milieux où vivent les organismes).

Qu'est-ce que la diversité génétique ? Prenons un exemple : toutes les oies d'un troupeau d'oies sauvages peuvent sembler identiques. En fait, elles sont toutes légèrement différentes les unes des autres. Rappelez-vous comment, dans l'histoire remarquable du voyage de Nils avec les oies, chaque oiseau se comportait différemment. Bien sûr, ce n'est qu'une histoire, mais elle est fondamentalement vraie. Une oie est plus prompte que les autres à remarquer un renard qui rampe vers une bande d'oies endormies sur la glace ; une autre se souvient d'où trouver une clairière avec de l'herbe luxuriante au bord d'un lac ; et une troisième est plus habile que les autres pour se frayer un chemin à travers les étoiles. Ainsi, l'ensemble du troupeau bénéficie des compétences particulières de ses individus. Et cela ne s'applique pas uniquement aux oies sauvages. Chaque type d'animal ou de plante doit résoudre des problèmes différents pour survivre, et ils y parviennent mieux s'ils ont chacun des capacités spéciales différentes que s'ils sont tous identiques, comme des robots construits sur le même tapis roulant.

La diversité génétique donne naissance à de nouvelles espèces. Les biologistes pensent que les différences de comportement et d'apparence – entre deux ours par exemple – peuvent s'accentuer au fil des générations. Et après de nombreuses années, les arrière-arrière-arrière-petits-enfants de ces ours s'installent dans différentes régions, commencent à chasser pour se nourrir de différentes manières et se préparent différemment à l'hibernation (ou même abandonnent l'hibernation). C'est ainsi que deux espèces différentes sont nées – en l'occurrence l'ours brun et l'ours noir d'Asie.

Ours brun

Ours noir d'Asie

La **différence entre les animaux de différentes espèces et les grands groupes taxonomiques**, tels que l'embranchement ou la catégorie, se voit aisément : nul besoin d'être scientifique pour distinguer un pissenlit d'un plantain, une libellule d'une fourmi, ou un corbeau d'un renard. Mais pourquoi ces animaux et les millions d'autres espèces d'êtres vivants sont-ils si différents ?

La savane africaine et ses habitants

Chaque espèce d'organisme présent sur la planète joue un rôle qui lui est propre. Dans la savane africaine, la partie supérieure de l'herbe est mangée par les zèbres, les parties inférieures sont consommées par les antilopes et les gnous, tandis que les gazelles broutent les herbes proches du sol, et que les phacochères déterrent les racines et les tubercules. L'alimentation à base de végétaux est donc exploitée de la manière la plus complète qui soit, sans que les différents types d'animaux ne se livrent concurrence. Cela signifie que la plupart des animaux vivant dans une région donnée sont bien nourris et en bonne santé, et que l'ensemble de l'écosystème restera stable pendant longtemps. Et ce, grâce à la diversité des espèces.

La diversité des écosystèmes est facile à voir pour tout voyageur attentif, si celui-ci est capable de distinguer un sureau d'un bouleau, ou un récif corallien d'une mangrove. La grande variété d'écosystèmes présents dans la nature offre un décor coloré, sur fond duquel le cycle sans fin de la vie suit son cours. Sauf que ce décor lui-même joue un rôle essentiel dans le cycle de la vie. La diversité des espèces crée les conditions de vie nécessaires pour un grand nombre d'organismes, en leur fournissant des sources de nourriture et d'eau, des abris et des voies de migration. Par exemple, certaines plantes vivant dans des ravins humides peuvent survivre à un grave incendie de forêt. Si un nombre excessif d'insectes d'une espèce donnée menace les cultures de pommes de terre, ceux-ci ne pourront se déplacer vers une zone où le sol gèle en profondeur en hiver. Par conséquent, plus la diversité des conditions naturelles sera grande, plus les chances que les différentes espèces survivent et que l'écosystème soit préservé seront élevées.

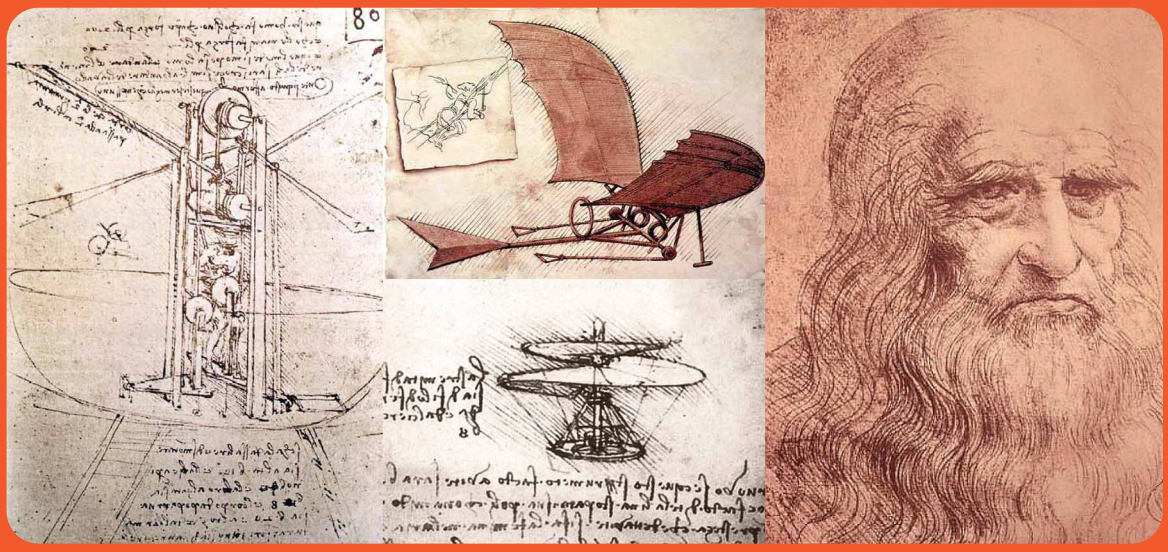
Les espèces sont inégalement réparties sur notre planète. La diversité des espèces dans la nature est à son point culminant autour de l'équateur et diminue vers les pôles. La plus grande diversité d'espèces se trouve dans l'écosystème des forêts tropicales humides, qui couvrent environ 7 % de la surface de la planète, mais contiennent plus de 90 % de l'ensemble des espèces que nous connaissons actuellement.

Pourquoi la biodiversité est-elle si importante ?

N'oublions pas que jusqu'à récemment (en termes historiques), tout ce que les gens mangeaient, utilisaient pour construire leurs maisons, comme médicaments, pour fabriquer des vêtements, et pour se déplacer, était puisé dans la nature. « Oui, mais cela n'est plus le cas » me diriez-vous. Et bien vous auriez tort. Par exemple, les scientifiques modernes consacrent toujours beaucoup de temps à sillonner les forêts pluviales à la recherche d'ingrédients naturels pour l'élaboration de nouveaux médicaments. Les plantes sauvages sont nécessaires à la création de nouvelles variétés de cultures. Les ingénieurs ont, pour leur part, « emprunté » nombre de leurs inventions techniques les plus originales au royaume animal, aux plantes, aux champignons et aux micro-organismes.

Mais ce n'est pas là le rôle le plus important de la biodiversité. Le plus important pour la biodiversité est de créer un habitat pour tous les êtres vivants, y compris les êtres humains. Que cela signifie-t-il exactement ? Depuis des millions d'années, tout ce qui pousse, court, nage, rampe et vole sur notre planète s'adapte à la composition de l'atmosphère de la Terre. Les modifications apportées à ce « cocktail » de gaz ne peuvent être qu'infimes. Toutefois, même une très légère diminution de la teneur en oxygène de l'air que nous respirons nous ferait nous sentir mal, de même pour de nombreux autres animaux. Si cette baisse des niveaux d'oxygène s'accentuait, nous nous sentirions encore plus mal. Et qu'est-ce qui maintient les niveaux d'oxygène dans l'atmosphère ? Les plantes vertes !

La bionique offre des solutions aux problèmes d'ingénierie en s'appuyant sur la connaissance de la structure et du fonctionnement des organismes vivants. Par exemple, au moment de la conception d'un nouveau revêtement pour les coques de navires, les travaux se sont fondés sur des études de la texture de la peau du dauphin, ce qui a permis d'accroître la vitesse de navigation des navires de 15 à 20 %. Le grand artiste et scientifique, Léonard de Vinci, a été l'un des créateurs de la bionique : il a tenté de construire un « ornithoptère », une machine volante avec des ailes qui battaient comme celles d'un oiseau.



L'ensemble des plantes et des animaux, des micro-organismes et des champignons forment un système extrêmement complexe et ultra-précis. Imaginez que vous et vos amis passiez deux années entières à bord d'un vaisseau spatial pour un voyage aller-retour à destination de Mars. Imaginez les différents composants, appareils et autres équipements que le vaisseau contiendrait ! Pouvez-vous imaginez que notre planète soit comme ce vaisseau ? Chacun de ses « composants » a été créé grâce à des millions d'années d'évolution, l'action de chaque composant a été réglée de manière à fonctionner en harmonie avec des milliers d'autres composants. Que se passerait-il si une erreur d'un membre de l'équipage ou si une météorite endommageait plusieurs dispositifs se trouvant à bord du vaisseau spatial ? Vous pourriez les remplacer par d'autres dispositifs semblables, du moins pendant un temps. Mais que se passerait-il alors si vous aviez un autre accident dans l'espace ?

La diversité biologique de la Terre fonctionne de la même façon. Chaque organisme joue un rôle important. L'un absorbe l'énergie du soleil, un autre se sert de l'énergie ainsi absorbée pour chasser des proies ou échapper à des prédateurs, un troisième assure la décomposition du bois mort ou des restes d'animaux morts, etc. Chacun d'entre eux, de l'imposant baobab au petit lichen, de la puissante baleine à la légère méduse, est un élément indispensable de la vie sur la Terre. Et d'autres organismes restent encore à découvrir !

Ils ne sont peut-être pas nombreux, mais ils sont également nécessaires. Vous pourriez vous dire : « Il y a eu des moments dans l'histoire de la vie sur la planète, où des groupes entiers d'organismes se sont éteints. La disparition d'une espèce n'est donc pas dramatique, ni même d'une douzaine ou d'une centaine… » Arrêtez ! Vous avez tort ! Nous ne savons pas combien de disparitions notre « vaisseau » peut tolérer. Peut-être avons-nous déjà franchi la ligne. Dans la brève histoire de l'humanité, la nature a irrémédiablement perdu non pas une centaine ou un millier d'espèces, mais bien plus !

Autre point important, la diversité biologique peut être considérée comme un instrument de mesure indiquant la durabilité et l'état de santé du milieu naturel. S'il y a beaucoup d'espèces différentes d'organismes vivants, chacun jouant son propre rôle, alors la forêt tropicale, les récifs marins ou les milieux humides boisés pourront continuer à exister encore longtemps.

Depuis les débuts de l'histoire, l'une des punitions les plus sévères consiste à enfermer une personne pendant une longue période dans une petite cellule aux murs gris où elle ne peut voir le ciel ou communiquer avec ses semblables.

Si le monde compte moins de plantes à jolies fleurs parfumées (ou même à fleurs discrètes et sans odeur), moins de belettes et martinets tournoyants (moins de tatous malhabiles ou de lentes tortues), alors notre planète mère s'apparentera de plus en plus à une cellule grise et terne !

Quelles sont les menaces qui pèsent sur la biodiversité ?

L'activité humaine représente la plus grande menace de perturbation de l'existence de la nature sauvage dans toute sa biodiversité. Nous abattons les forêts, labourons la steppe, brûlons la savane, asséchons les marécages, chassons pour le plaisir, pêchons, et polluons nos rivières. Bien sûr, nous ne le faisons pas dans l'intention de détruire le milieu naturel. Notre objectif est de nourrir la population mondiale croissante, de nous procurer du bois pour fabriquer des choses, de produire de l'énergie, d'élever du bétail, de faire de la place pour la construction de nos villes, routes, sites militaires et décharges, et bien plus encore.
La biodiversité est particulièrement vulnérable à l'évolution des conditions naturelles, qu'il s'agisse de changements de température, d'incendies de forêt, de fonte du pergélisol, d'assèchement des zones humides, de fluctuations du niveau de l'océan, etc. Vous savez déjà pourquoi de tels changements se produisent.
Un été exceptionnellement chaud n'est pas une catastrophe en soi. Sur des milliers d'années d'évolution, la vie végétale et animale s'est adaptée aux fluctuations climatiques à court terme et aux évolutions progressives de la nature. Ce qui menace la biodiversité, ce sont les modifications rapides et irréversibles de l'environnement, et notamment les changements climatiques. Essayons de comprendre pourquoi.

Extinctions massives et changement climatique

Tout au long de la période de développement de la vie sur terre, dont la science a connaissance (trois milliards d'années, pas plus), plusieurs dizaines de périodes de changement climatique soudain ont été relevées, lesquelles ont entraîné une diminution significative de la biodiversité. Cinq d'entre elles se démarquent, communément appelées les « grandes extinctions ». L'une des plus dramatiques d'entre elles est survenue il y a 250 millions d'années. À cette époque, la Terre n'était pas encore peuplée par les plantes et les animaux que nous connaissons aujourd'hui, mais la diversité des formes de vie était déjà considérable. Et puis soudainement, du point de vue géologique, en l'espace de quelques millions d'années, la plupart des espèces animales et végétales ont disparu (il y avait beaucoup moins d'espèces végétales que d'espèces animales à l'époque, puisque la vie au sein des océans et des mers, composée principalement d'animaux, était bien plus riche que sur terre).

La disparition de certaines espèces et l'apparition de nouvelles est un processus constant dans l'histoire géologique de la biosphère de la Terre : aucune espèce n'existe éternellement. L'extinction a été compensée par l'apparition de nouvelles espèces, et le nombre total d'espèces dans la biosphère a augmenté. L'extinction d'espèces est un processus évolutif naturel qui se produit sans aucune intervention humaine.

Quelles causes mystérieuses ont pu entraîner l'extinction totale de certaines espèces et l'apparition de nouvelles ? Les scientifiques ont des raisons sérieuses de supposer que les principales causes en sont les changements majeurs survenus à la surface de la planète, notamment la dérive des continents à la surface de la croûte terrestre (nous avons abordé ce sujet dans les sections précédentes). La dérive des continents a transformé la structure du milieu naturel tel qu'il existait à l'époque, y compris la position de chaînes de montagnes et le système des courants océaniques, et, bien sûr, a radicalement modifié le climat terrestre. Le moment du réchauffement climatique est advenu après les ères précédentes marquées par le refroidissement de la planète. Le climat est devenu plus sec et les variations saisonnières de température ont augmenté. Les niveaux d'oxygène à la surface de la terre se sont également modifiés. Tout ceci a entrainé, comme nous l'avons vu, le remplacement à grande échelle de certaines espèces par de nouvelles espèces d'êtres vivants.

D'autres extinctions d'espèces se sont produites, mais jamais à la mesure de ce premier événement. Il y a environ 60 millions d'années, une autre modification soudaine des conditions de vie sur la planète s'est produite, entraînant l'extinction des derniers dinosaures. Cette modification s'est également accompagnée d'un changement climatique, qui a accéléré le processus de remplacement de certains animaux et plantes par de nouvelles espèces. D'autres groupes d'êtres vivants, comme les ammonites (mollusques marins qui ressemblent à une corne de bélier) et les bélemnites, dont les fossiles ressemblent à des pointes de flèche, ont suivi l'extinction des dinosaures. Près de la moitié des créatures marines ont disparu à cette époque, mais le nombre de créatures ayant disparu sur terre demeure inconnu, car les restes des organismes terrestres sont bien moins conservés.

Ammonites

Bélemnites

Le refroidissement climatique s'est accompagné de la formation de calottes glaciaires aux pôles terrestres. Les vastes étendues de glace qui existent actuellement au Groenland et en Antarctique sont visibles sur les photographies de la Terre prises depuis l'espace. Combien faut-il d'eau pour former de telles calottes glaciaires ? Énormément. D'où provient-elle ? Elle ne peut que provenir de l'océan. Lorsque les calottes glaciaires se forment, le niveau de la mer baisse et les conditions de vie de tous les organismes qui vivent le long des côtes, dans l'eau et sur la terre, changent radicalement.

Par conséquent, entre autres effets, le changement climatique affecte la biodiversité, et dans les premiers temps, de la manière la plus défavorable qui soit. Après cela, la vie sur Terre réapparait progressivement, mais jamais sous sa forme antérieure ! Des millions d'années sont nécessaires pour que cette réapparition prenne forme, et les espèces éteintes ne réapparaitront jamais. Souhaitons-nous l'extinction de notre espèce ?

Quels sont les animaux qui s'adaptent le plus rapidement au changement climatique ?

Bien sûr, tout ce dont nous avons discuté jusqu'à présent s'est produit dans un passé très lointain, si lointain que nous ne pouvons l'imaginer. Mais comment le changement climatique impacte-t-il de nos jours la faune dans toute sa diversité ?

L'impact de l'activité humaine et le changement climatique brutal ont entraîné des taux d'extinction des espèces, sur l'ensemble de la planète, nettement supérieurs à ceux occasionnés par la nature.

Les petits animaux ayant des cycles de vie courts sont particulièrement dépendants des conditions environnementales et, par conséquent, réagissent plus rapidement aux changements climatiques. Bien sûr, les organismes de grande taille réagissent également, mais dans leur cas l'effet est plus long à constater. Pour les besoins de nos recherches, nous voulons connaître les événements qui se produisent à l'heure actuelle ou qui se produiront dans un proche avenir, les événements dont nous serons témoins.

Une augmentation modérée mais soutenue des températures moyennes de 1,5 à 2 °C dans les montagnes slovaques a eu des conséquences pour le moins inattendues. De jolis papillons affectionnant la chaleur de la famille des porte-queue, à savoir le Flambé et le Machaon, se sont propagés au-delà de la zone de steppe boisée dans laquelle ils vivaient, et ont fait leur apparition dans des prairies plus fraîches et plus humides. Ils ont également commencé à se reproduire trois fois par an au lieu de deux, comme auparavant.

D'autres papillons, du genre de l'Araschnia, avaient auparavant pour habitude d'arborer différentes couleurs en fonction des saisons : marron au printemps, noir en été et de nouveau marron en automne. Ils sont désormais noirs tout au long de l'année.

Toujours dans les montages slovaques, les biologistes ont relevé deux tendances opposées dans les cycles de vie de la dendroctone de l'épicéa et de l'arpenteuse tardive. Les dendroctones ont élargi la surface de leur habitat avec la hausse des températures, alors que les voraces chenilles, au contraire, se nourrissent moins de leurs arbres favoris. Dans les deux cas, il existe une corrélation directe entre les variations de température et le comportement des insectes.

Machaon (papillon)

Dendroctone de l'épicéa

L'eleutherodactylus limbatus est une petite grenouille qui habite dans les forêts tropicales, où les variations de température et du taux d'humidité durant la journée et sur l'ensemble de l'année sont relativement faibles, bien qu'elles se produisent. Les scientifiques se sont intéressés aux particularités de la relation entre la grenouille et un champignon parasite qui pousse sur son corps. Il a été établi que le parasite était bien moins vulnérable à un changement des conditions environnementales que son hôte (la grenouille). Le changement climatique rend donc le parasite plus dangereux pour la grenouille, menaçant ainsi l'entière population de l'espèce hôte.

Eleutherodactylus limbatus

Dans les eaux froides de l'océan Austral, la moindre hausse de température entraîne une augmentation de l'acidité et une diminution de la teneur en oxygène. Cela a entraîné des migrations massives de mollusques bivalves de l'espèce des *Laternula elliptica* loin de la zone de danger. Cependant, les mollusques plus anciens (âgés de plus de trois ans) n'ont pas la force musculaire nécessaire pour migrer et périssent donc en grand nombre. Vous pourriez vous demander : ces créatures ne peuvent-elles pas s'installer dans de nouvelles régions et rétablir leur population ? Mais cela n'est pas si simple : cette espèce n'est capable de se reproduire qu'après trois ans, soit au moment où elle perd sa mobilité !

Laternula elliptica

Récif corallien

Les coraux ont également été parmi les premiers à être affectés par le changement climatique. Les coraux sont des organismes très sensibles. Une eau trop chaude ou trop froide, un manque de lumière ou l'excès d'impuretés, tous ces éléments favorisent le ralentissement, voire l'arrêt, de la croissance des coraux. Les polypes des coraux ne peuvent se déplacer et s'adaptent donc très difficilement aux changements environnementaux. Ils doivent vivre et mourir là où ils sont nés. Les micro-algues qui absorbent l'énergie du rayonnement solaire pour les polypes des coraux sont particulièrement dépendantes de la température de l'eau. En de nombreux endroits de la Grande barrière de corail australienne, les scientifiques ont pu constater la mort des algues et le blanchiment des coraux, qui se produit lorsque le récif meurt. Ceci est le résultat des vagues de chaleur marines répétées au cours des dernières années qui ont donné à une grande partie de la Grande Barrière de Corail une couleur blanche fantomatique. La fumée émanant des graves incendies de forêt et de tourbe en Indonésie produit souvent des rejets atmosphériques de composés de fer, ce qui entraine la prolifération rapide d'algues produisant des substances toxiques pour les coraux.

Pourtant, il existe récemment des innovations réussies en matière de sauvegarde des coraux. L'Institut australien des sciences marines multiplie un grand nombre de coraux sains dans une installation aquacole afin de mieux comprendre la biologie et l'écologie de la reproduction des coraux. L'institut collecte des fragments de corail du récif, qui sont pondus et fécondés, puis les larves sont élevées dans des pépinières et installées sur des surfaces spécialement conçues. Les coraux déposés, ou fragments fabriqués à partir des adultes, sont placés sur des appareils sur le récif. Les plongeurs revisitent ensuite les sites pour identifier et comprendre les conditions environnementales dans lesquelles les coraux survivent et se développent le mieux. Ces connaissances aideront à concevoir et à améliorer les systèmes d'aquaculture corallienne afin d'améliorer la survie de bout en bout des coraux sur les récifs dégradés, depuis le frai jusqu'à l'installation et l'âge adulte.

Salpes

Le réchauffement qui touche les régions polaires réduit l'étendue des glaces marines saisonnières, dont la partie inférieure constitue une aire fertile pour la reproduction des plantes océaniques microscopiques appelées phytoplancton. Le phytoplancton constitue la base d'une chaîne alimentaire englobant le krill, les poissons, les pingouins et autres oiseaux de mer, les phoques et plusieurs sous-espèces de baleines. S'il n'y a pas assez de glace, le phytoplancton ne peut se développer et se reproduire en nombre suffisant. Le krill ne peut survivre dans une eau qui lui offre peu de nourriture, et se voit remplacer par des salpes translucides à tissu mou, qui sont d'anciennes créatures. Cela entraîne alors une rupture de la chaîne alimentaire, car quasiment aucun animal ne se nourrit de salpes, à l'exception de quelques espèces de poissons et de tortues de mer. Les baleines ne peuvent donc accumuler suffisamment de réserves de graisse durant les mois d'hiver, tandis que d'autres créatures désertent également les eaux qui ne peuvent leur fournir la nourriture dont elles ont besoin. Là encore, nous pouvons voir les interactions complexes propres à la nature, qui se reflètent dans la biodiversité.

Le rétrécissement de la calotte glaciaire du pôle Nord est le signe le plus visible du réchauffement climatique. Les ours polaires ont besoin de glace pour assurer leur migration et pour chasser les phoques ; la glace est également d'une importance vitale pour les phoques eux-mêmes, car sans elle, ils n'auraient nulle part où élever leurs petits. Si les champs de glace commencent à diminuer au-delà des seuils habituellement constatés chaque été, la population de phoques diminuera également et les ours polaires affamés se nourriront de l'ensemble de la carcasse des phoques qu'ils attraperont, plutôt que de ne dévorer que leur couche de graisse. Auparavant, les restes des repas de l'ours polaire offraient un véritable festin aux autres habitants de l'Arctique – le renard arctique et de nombreux oiseaux. Mais désormais, il ne leur reste plus rien !

Au nord de l'Eurasie, à mesure que le climat se réchauffe, la forêt progresse doucement mais sûrement vers la toundra, à un rythme de dix kilomètres par siècle. Cela entraine une modification de l'habitat et des sources d'alimentation de nombreuses espèces d'oiseaux. Dans l'Arctique, les hivers doux ont également des conséquences désastreuses aussi bien pour le renne domestiqué que pour le renne sauvage, le dégel et les précipitations hivernales recouvrant la neige d'une croûte de glace, rendant plus difficile pour les rennes la recherche de lichens, base incontournable de leur alimentation durant les mois d'hiver.

Le lemming, dont la population est la plus nombreuse de la toundra, souffre également des conséquences du réchauffement climatique. Le trou où vit le lemming se remplit désormais d'eau bien trop tôt dans l'année, réduisant ainsi la population des lemmings et affamant les oiseaux de proie et les renards. Dans l'hémisphère Sud, sur la côte Antarctique, qui a l'apparence d'un désert de glace avec quelques affleurements rocheux et une végétation très clairsemée, les chercheurs ont soudainement découvert d'abondants fourrés d'herbe du cheveu antarctique, une petite plante qui ne poussait précédemment qu'en petites mottes entre les pierres, à l'abri des vents glacials du continent austral.

Ours polaires

Renne

Lemming

Dans la steppe de Daourie à l'est de la Russie, entre le lac Baïkal et la chaîne montagneuse du Grand Khingan de Mongolie, les scientifiques ont constaté que le climat devenait plus aride, et ce en raison du réchauffement climatique. Les lacs et les petits cours d'eau disparaissent, les rideaux forestiers se dessèchent, et la végétation de la steppe est brûlée par le soleil plus tôt dans l'année. Les animaux de la steppe font ce qu'ils peuvent pour s'adapter au changement. Les oiseaux migrent vers d'autres endroits, changeant ainsi leurs routes de migration et leurs sites de nidification. Les quantités de nourriture sont insuffisantes pour l'ensemble des oiseaux d'eau locaux, comme le cormoran, le héron cendré et le goéland argenté. southern continent.

Lièvre de Tolai

L'oie cignoïde ne nidifie plus dans cette région. Les loups, les renards, les blaireaux et même les grues s'éloignent à la recherche de plus d'eau. Les oiseaux de proie, qui ont besoin de beaucoup d'eau pour digérer leur alimentation à base de viande, migrent également vers des régions plus adaptées. Le lièvre de Tolai se retrouve, pour sa part, à court d'herbe durant l'été, non seulement pour se nourrir, mais également pour se cacher des prédateurs ! La marmotte tabargan et le spermophilus dauricus, tous deux originaires de la région, sont bien adaptés aux sécheresses, mais voient toutefois leur vie se compliquer dans ce nouveau contexte, car ils ne peuvent se déplacer suffisamment rapidement pour échapper aux feux de broussaille, qui sont de plus en plus fréquents en été. L'herbe brûlée entraîne une pénurie de fourrage hivernal pour les ongulés, contraignant ainsi de vastes troupeaux d'antilopes et de gazelles à migrer de la Mongolie à la Russie.

Manul

Les quelques points d'eau restant dans la steppe daourienne sont surpeuplés d'animaux à la recherche d'eau, ce qui augmente le risque de maladie. Tout comme les étés sont devenus plus secs, les hivers connaissent davantage de chutes de neige, en conséquence le manul (une espèce de chat sauvage) ne parvient pas à trouver de nourriture. Le hérisson daourien est quasiment le seul à tirer profit du changement climatique : il lui faut plus de cinq mois de chaleur pour assurer son cycle de vie, ce nouveau contexte lui permet donc de renforcer sa présence.

Parcs nationaux : apprendre à préserver la nature

Qu'est-ce qu'un parc national ? Il s'agit d'une zone protégée ouverte aux touristes, mais où l'activité humaine est limitée par des règles précises. Les parcs nationaux sont habituellement créés dans des endroits renfermant différents paysages (à la fois typiques et uniques), des espèces animales ou végétales rares ou menacées, et des phénomènes géologiques ou d'eau uniques. Les parcs nationaux sont visités par des adultes et des enfants, qui ainsi en apprennent davantage sur les problèmes environnementaux mondiaux. Les parcs nationaux peuvent abriter des nurseries pour la reproduction d'espèces végétales ou animales rares, qui sont ensuite déplacées dans des zones situées en dehors du parc.

Le changement climatique affecte-t-il les parcs nationaux ? Malheureusement, le changement climatique mondial entraine des incendies, des sécheresses, une hausse de la température atmosphérique et bien d'autres phénomènes qui ne peuvent être contenus simplement en déclarant une zone parc national.

Les conditions nécessaires à la faune et la flore d'eau douce du parc des Everglades en Floride (USA) varient selon l'afflux d'eau salée provenant de la baie de Floride toute proche, un processus influencé par le changement climatique. Les scientifiques et le personnel des zones protégées sont conscients que ces processus menacent l'existence même des parcs nationaux, et l'Agence américaine de protection de l'environnement, en collaboration avec le Service des parcs nationaux, ont par conséquent élaboré un programme spécial : « Parcs respectueux du climat ». Le programme vise à sensibiliser le personnel des parcs et les visiteurs aux causes et conséquences du changement climatique, et leur explique ce qu'ils peuvent eux-mêmes faire pour contribuer à résoudre les problèmes mondiaux y étant associés.

Parc national de Laheema (Estonie)

Parc national de Jasper (Canada)

Parc national Kruger (Afrique du Sud)

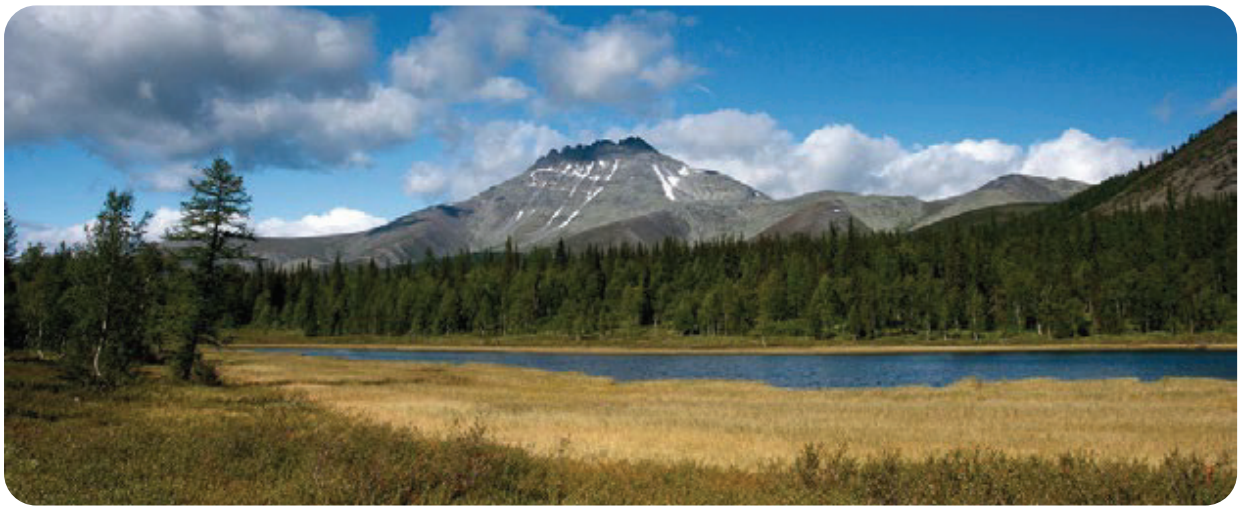
Le **parc de Yellowstone**, célèbre dans le monde entier, a été créé en 1872 : il s'agit du parc national le plus ancien des USA.

La Grande barrière de corail est indispensable à l'existence de nombreux organismes vivants et est gravement affectée par le changement climatique. Celle-ci est une zone protégée du Parc national marin australien, et est également classée comme Site du patrimoine mondial de l'UNESCO et reconnue comme l'une des sept merveilles du monde. Il s'agit de la seule structure vivante sur la planète, qui est visible depuis l'espace.

L'itinéraire piéton le plus long en zone protégée se trouve également aux USA, dans le parc national des **Great Smoky Mountains**.

Le parc national de Namib-Naukluft en Namibie (Afrique de l'Ouest) est célèbre pour ses magnifiques dunes de sable orange, qui sont les plus hautes du monde, certains endroits s'élevant à plus de 300 mètres au-dessus du sol. Le parc bénéficie des réserves fauniques et naturelles parmi les plus insolites au monde, et s'étend sur une zone de plus de 49 000 km^2, soit plus grande que la Suisse.

Parc national de Yougyd va (Russie)



Réserves naturelles : la nature sans l'homme

Les réserves fauniques (biosphère) sont des endroits où les scientifiques peuvent surveiller et enregistrer les changements qui surviennent dans le milieu naturel. Dans une réserve faunique, il est strictement interdit de cueillir des baies, des champignons ou de pêcher. Ces endroits sont parfaits pour le rétablissement des populations d'espèces en danger, qui peuvent ensuite être relâchées dans des secteurs appropriés en dehors de la réserve.

Les réserves de biosphère sont souvent créées dans des endroits où la nature n'est sujette à aucune influence significative de l'homme. Elles sont utilisées pour préserver les écosystèmes locaux typiques, ainsi que les espèces et communautés rares de plantes et d'animaux. À titre d'exemple, l'écosystème à protéger dans les régions de la taïga serait celui de la taïga, tandis que dans une région tropicale, il s'agirait de la forêt tropicale humide. La conservation de l'environnement naturel dans ces zones revêt une importance mondiale.

Des réserves de biosphère existent sur tous les continents. Vous avez probablement déjà vu des films concernant l'existence de ces réserves en Afrique. Grâce à ces réserves de biosphère, le milieu naturel diversifié du continent africain est préservé pour nous aujourd'hui.

Réserve de biosphère de Belovezhskaya Pushcha / Forêt de Bialowieza (Biélorussie, Pologne)

Parc national des Everglades (USA)

UNE RÉSERVE FAUNIQUE (BIOSPHÈRE)
est un territoire protégé, où aucune activité humaine n'est tolérée, à l'exception de l'activité scientifique.

Toutes les réserves de biosphère participent au programme sur l'Homme et la biosphère, dirigé par l'UNESCO et qui soutient les recherches en cours et à long terme sur l'environnement. Des recherches sont actuellement menées dans de nombreuses réserves concernant l'impact du changement climatique sur la vie animale et végétale. Les scientifiques travaillant dans la réserve de biosphère du Caucase en Russie ont découvert que la couverture forestière présente sur les versants des montagnes de la région monte progressivement de plus en plus haut, à mesure que le climat se réchauffe.

Le parc national américain de Zion est un bel exemple de la manière dont nous pouvons assurer la sécurité de l'environnement. Environ 20 bus, utilisant un combustible gazeux à faibles émissions, transportent les visiteurs dans le parc, remplaçant ainsi les quelques 5 000 voitures que les visiteurs auraient autrement utilisées. Il en a résulté une baisse significative des émissions de gaz à effet de serre. Un « Centre écologique » implanté dans le parc pour accueillir les touristes couvre près d'un tiers de ses besoins énergétiques grâce au soleil et 80 % de ses besoins en éclairage grâce à la lumière du jour. En été, le système de climatisation utilise des évaporateurs à faible consommation d'énergie, et en hiver un système de chauffage passif, qui utilise un mur de matériaux absorbant la chaleur (pierre, brique) exposé au soleil, optimise la rétention de la chaleur.

Le parc national de Taganaï en Russie, a récemment installé le premier système écologique d'approvisionnement en énergie à être utilisé au sein d'une zone naturelle protégée. L'un des abris du parc tire désormais son électricité de l'énergie éolienne (éoliennes) et du soleil (panneaux solaires). Le système détermine automatiquement quelle source d'énergie utiliser à un moment précis (solaire ou éolienne). Auparavant, cet abri et d'autres, ainsi que les installations du parc, étaient dépendants de générateurs à essence pour leurs besoins énergétiques – une source d'énergie à la fois onéreuse et nocive pour l'environnement. Un nouveau système d'éclairage, alimenté par l'énergie solaire et éolienne, a été installé à Adler dans la section Yuzhniye Kultury du **parc national de Sotchi** au sud de la Russie.

Réserves naturelles et zones naturelles protégées d'importance

Les réserves naturelles ont pour objectif de protéger non pas l'ensemble du milieu naturel local, mais certaines parties seulement : par exemple, uniquement les plantes ou uniquement les animaux, ou éventuellement certaines particularités géologiques (roches ou grottes). Les restrictions relatives à l'activité humaine dans ces réserves concernent donc uniquement toute activité susceptible de menacer les éléments protégés de l'environnement.
Les zones naturelles protégées d'importance exceptionnelle sont des zones naturelles typiques ou uniques, ayant une valeur scientifique, culturelle, pédagogique ou sanitaire particulière. Il peut s'agir de lacs, d'arbres, de sites géologiques ou de parcs anciens. Ainsi, l'interdiction de mener certaines activités humaines se réfère à celles susceptibles de porter atteinte aux éléments concernés par les mesures de protection.

Comment les zones protégées permettent-elles de lutter contre le problème du changement climatique

En quoi un parc national (et toute autre zone protégée) contribue-t-il à lutter contre le changement climatique ? La contribution la plus significative est la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Par exemple, certains parcs encouragent les touristes à utiliser des bus publics utilisant des carburants alternatifs plutôt que des voitures polluantes. Les employés des parcs eux-mêmes utilisent des moyens de transport ayant une incidence minimale sur l'environnement. Les parcs peuvent recourir à l'énergie du vent, du soleil ou des sources chaudes pour le fonctionnement de leurs locaux d'accueil des visiteurs. L'éclairage naturel et la LED sont utilisés au maximum, et l'électricité nécessaire aux bureaux est tirée de panneaux solaires. Les souvenirs proposés aux touristes sont fabriqués à partir de matériaux recyclés, la cafétéria du parc sert des plats cuisinés à partir de produits locaux (des produits qui n'ont pas à parcourir de grandes distances, avec la pollution due au transport que cela implique, et qui sont cultivés ou produits d'une manière respectueuse de l'environnement), et les locaux du parc sont équipés de toilettes économiques en eau. Des informations sont fournies aux visiteurs afin de leur apprendre comment se comporter de la manière la plus efficace et la moins dommageable pour l'environnement.

Écotourisme : l'harmonie entre l'homme et la nature

Vous aimez la marche et les activités de plein air ? Si oui, vos amis et vous aimerez voyager et découvrir de nouveaux endroits. Peut-être deviendrez-vous même des écotouristes.

Quelle est la différence entre touriste et écotouriste ? Ce qui les différencie le plus est leur attitude envers l'environnement. L'écotourisme est un concept récent qui a émergé lorsque les gens ont commencé à comprendre à quel point la nature était importante pour nous. Il y a différentes façons de se relaxer en extérieur. Vous pouvez simplement aimer vous rendre en forêt ou au bord d'un lac en voiture, mettre la musique à fond, faire un feu dans l'endroit le plus beau que vous trouverez, manger en abondance et laisser un amas de déchets derrière vous. Mais pour d'autres touristes, le plaisir se trouve dans le fait de monter jusqu'au sommet d'une montagne, d'observer des animaux sauvages, de partir à la recherche de plantes rares, d'écouter le chant des oiseaux, ou de profiter d'un coucher de soleil et du silence. Leur principal objectif est d'observer et d'écouter le milieu naturel, ce à quoi le monde moderne a rarement accès. Ils ne laissent pas déchets derrière eux ; au contraire, ils ramassent souvent les ordures des autres personnes et veillent à observer toutes les règles en vigueur pour protéger l'environnement. Heureusement, le nombre d'écotouristes augmente d'année en année !

L'écotourisme offre aux gens l'opportunité de voir l'environnement dans un état naturel et préservé, de comprendre à quel point celui-ci est diversifié et vulnérable à l'activité humaine, et de se poser la question suivante : « Que puis-je faire pour la planète ? » Les écotouristes observent les lois de la nature et mettent en place des choses pour la protéger et la préserver. Ils tentent de réduire leur impact environnemental au minimum. Qui plus est, les entreprises d'écotourisme reversent une part de leur chiffre d'affaires à des initiatives de protection et d'étude de l'environnement.

De nombreux environnements naturels exceptionnels se trouvent dans des zones reculées, au sein de zones rurales où les gens sont relativement pauvres. Ils se trouvent également dans des zones telles que les jungles de l'Amérique du Sud ou les régions montagneuses frontalières situées entre le nord de la Thaïlande, le Myanmar et le Laos, lesquelles sont habitées par des peuples indigènes. Par conséquent, les écotouristes en apprennent souvent davantage non seulement sur le milieu naturel, mais également sur la culture humaine. L'écotourisme fournit également du travail et des sources supplémentaires de revenus aux personnes qui vivent dans ces régions.

L'écotourisme permet donc aux gens d'observer la beauté et le caractère unique de la nature, de comprendre à quel point tout est relié dans le monde qui les entoure, de savoir combien d'espèces d'animaux et de plantes notre planète renferme, et de comprendre à quel point l'environnement dépend des actions de chacun, adolescents et enfants comme adultes.

Un éco-hôtel au Costa Rica

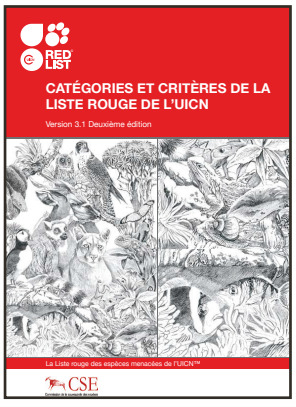
Que sont la Liste rouge mondiale et le Livre rouge et à quoi servent-ils ?

La Liste rouge est une liste des espèces rares et menacées d'animaux, de plantes et de champignons. La couleur rouge vise à nous rappeler le risque auquel ces espèces sont exposées et l'urgente nécessité de les protéger et de les préserver.

La liste des organismes vivants du monde entier ayant besoin de protection sont répertoriés dans le Livre rouge international, dont l'exemplaire original est conservé dans la ville suisse de Morges. Ce livre est publié par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) et est paru pour la première en 1963. Ce livre un peu particulier fait davantage office de calendrier que de livre ordinaire : à mesure que le temps passe, la situation des espèces déjà présentes dans le livre évolue, et les noms de nouvelles espèces de plantes, d'animaux et de champignons y sont ajoutées. Le Livre rouge est donc sans cesse modifié et élargi.

Pour chaque espèce qu'il consigne, le Livre rouge fournit des informations sur sa répartition, sa population, les caractéristiques de son habitat et les mesures requises pour sa préservation, ainsi que bien d'autres détails. Les pages du Livre sont marquées de différentes couleurs. Les pages décrivant les espèces éteintes sont marquées en noir. Cela englobe, par exemple, la vache de mer, la tourte voyageuse et le dodo. Les pages marquées en rouge concernent les espèces très rares et menacées (le léopard d'Extrême-Orient, le tigre de Sibérie, le léopard des neiges et le bison européen). Les animaux dont les populations sont en forte baisse sont répertoriés sur les pages marquées en jaune (l'ours polaire, la mouette rosée et la gazelle à goitre). Les animaux et les plantes que l'on trouve rarement à l'état sauvage sont consignés sur des pages blanches. Les espèces qui n'ont pu être suffisamment étudiées car elles vivent dans des zones reculées sont répertoriées sur les pages grises, tandis que les pages vertes, symbole d'espoir, consignent les espèces que l'homme a pu sauver de l'extinction (comme le castor fiber et le wapiti eurasien).

Chaque pays et région du monde élabore également sa propre liste d'espèces rares et protégées. Avant d'inclure une espèce en particulier dans le Livre rouge, les scientifiques étudient de façon intensive la flore, la faune et les champignons des zones concernées, déterminent les facteurs qui menacent l'espèce, décrivent son habitat et déterminent comment la préserver. Le Livre rouge répertorie non seulement les espèces rares et endémiques (espèces que l'on ne trouve que sur un territoire donné), mais également un éventail de plantes à fleurs, de plantes comestibles et médicinales.



Les animaux et les plantes peuvent avoir besoin d'être protégés pour deux types de motifs : directs et indirects. On parle de motifs directs de protection lorsque les gens, de par leurs actions, procèdent à la destruction d'animaux et de plantes, en chassant, en collectant des plantes médicinales, en pêchant ou en collectant autrement des organismes aquatiques. On parle de motifs indirects en cas de modification de l'habitat, y compris celle résultant du changement climatique mondial. Parmi les motifs indirects figurent notamment la difficulté d'adaptation au changement climatique, l'introduction de nouvelles espèces de plantes (lorsque les « nouvelles venues » supplantent les espèces indigènes, pour diverses raisons), ainsi que la destruction des plantes sources d'alimentation pour les animaux, etc.

Quelles sont les solutions d'adaptation basées sur les écosystèmes ?

Les solutions d'adaptation disponibles peuvent renforcer la résistance aux risques climatiques et, dans de nombreux cas, offrir simultanément des avantages plus larges en matière de développement durable.

L'une de ces solutions est l'adaptation basée sur les écosystèmes, qui peut aider les communautés à s'adapter aux impacts déjà dévastateurs sur leurs vies et leurs moyens de subsistance, tout en préservant la biodiversité, en améliorant les résultats en matière de santé, en renforçant la sécurité alimentaire, en apportant des avantages économiques et en améliorant la séquestration du carbone. De nombreuses mesures d'adaptation basées sur les écosystèmes – notamment la protection, la restauration et la gestion durable des écosystèmes, ainsi que des pratiques agricoles plus durables telles que l'intégration des arbres dans les terres agricoles et l'augmentation de la diversité des cultures – peuvent aujourd'hui être mises en œuvre à des coûts relativement faibles. La clé de leur succès est d'impliquer les communautés locales et de garantir que les stratégies sont conçues pour tenir compte de l'impact de l'augmentation de la température mondiale sur les écosystèmes.

.

Figure 2.2.1 Adaptation basée sur l'écosystème apte à protéger les vies et les moyens d'existence

QUESTIONS

1. Lequel des écosystèmes de la Terre est le plus riche en termes de diversité des espèces ?

2. Qu'entend-on par causes « directes » et « indirectes » d'extinction des organismes vivants ? Donnez des exemples.

3. Comment vos amis et vous commenceriez-vous une histoire en classe qui parle de l'importance de la biodiversité ? Quels sont les arguments les plus convaincants pour les écoliers et pour les adultes ?

4. Pourquoi le Livre rouge et la Liste rouge sont-ils rouges ? Quels sont les plantes, les animaux et les champignons répertoriés dans le Livre rouge que vous connaissez ? Pourquoi sont-ils en voie de disparition ?
Pouvons-nous aider à la préserver ?
Quelles sont les différentes couleurs utilisées sur les pages du Livre rouge ?

5. Que signifient les différentes couleurs utilisées ?

6. Pourquoi le Livre rouge s'étoffe-t-il de plus en plus à chaque mise à jour ?

7. Comment le réchauffement climatique affecte-t-il les rennes ?

8. Qui peut être qualifié d'« écotouriste » ?

EXERCICE

En collaboration avec le reste de votre classe, créez votre propre Livre rouge. Dessinez chacun un animal, une plante ou un champignon ayant besoin d'être protégé(e) sur une page d'une certaine couleur et expliquez votre choix.

2.3 Les effets du changement climatique sur les forêts

Qu'est-ce qu'une forêt ?

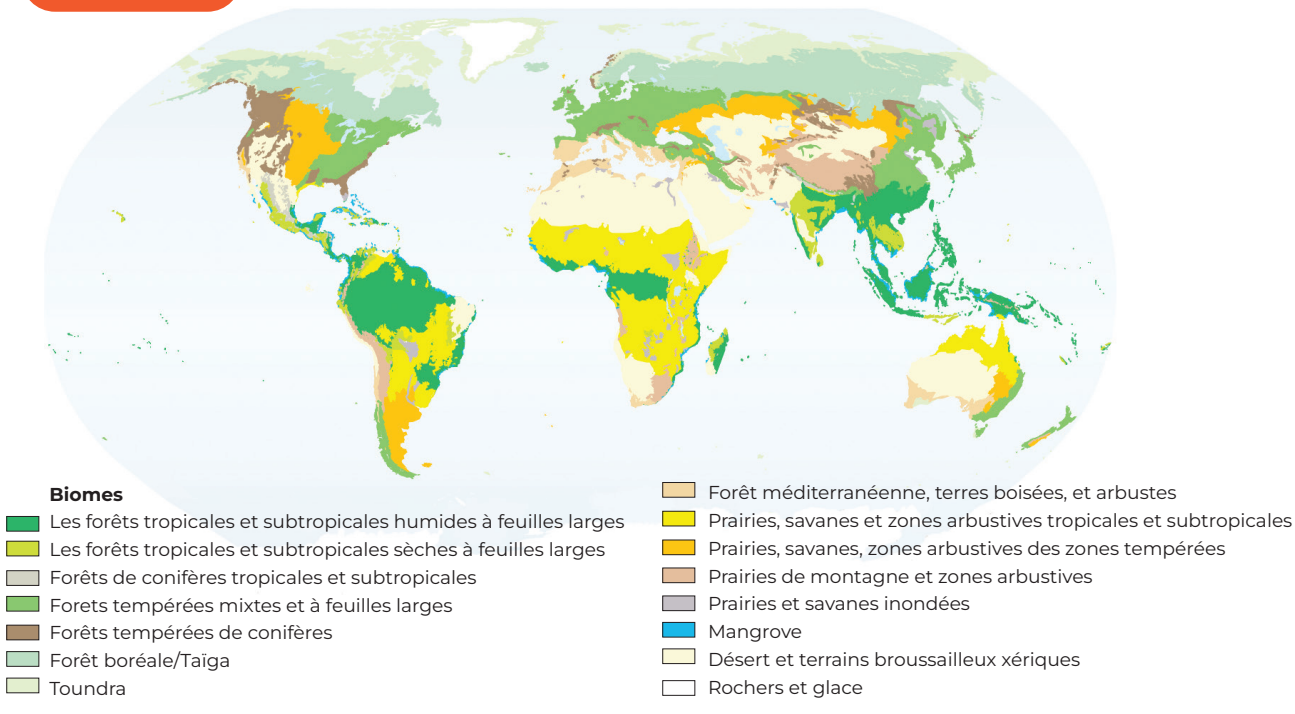
Bien que le terme « forêt » soit couramment utilisé, il n'est pas facile de clairement définir de quoi il s'agit. Il existe plus de 800 définitions différentes du mot « forêt » dans le monde ! Néanmoins, l'approche la plus reconnue pour identifier une forêt, également utilisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), comprend les indicateurs suivants : 1) des arbres d'une hauteur minimale de 5 m, 2) un couvert arboré supérieur à 10 % (proportion du sol ombragée par la couronne des arbres) et 3) une superficie de la zone forestière de plus de 0,5 hectares. Selon cette définition, il y a un peu moins de 4 milliards d'hectares de forêts sur Terre, couvrant environ 30 % de la superficie totale. Environ la moitié de la zone forestière mondiale se situe dans trois pays : la Russie, le Canada et le Brésil.

Types de forêts

Les forêts sont habituellement classifiées en fonction de l'espèce d'arbre dominante (feuillus, conifères (feuillage persistant), ou mixte) et de la durée de vie de leur feuillage (feuilles persistantes ou caduques). Les principaux types de forêts (cf. Fig. 2.3.1) sont les suivants :

- **Les forêts boréales** (taïga) sont généralement composées de conifères et arbres à feuillage persistant.
- **Les forêts tempérées** comprennent des forêts de feuillus décidues, des forêts de conifères et des forêts mixtes (mélange des deux types). Les régions chaudes tempérées abritent des forêts sempervirentes à feuilles larges.
- **Les forêts méditerranéennes** sont généralement composées d'arbres feuillus persistants et sclérophylles. Sclérophylle signifie « feuilles coriaces » en grec, car ces arbres possèdent généralement de petites feuilles sombres couvertes d'une pellicule cireuse visant à retenir l'humidité durant les mois secs de l'été. Des forêts de conifères sont également présentes dans cette zone.
- **Les forêts tropicales et subtropicales** comprennent des forêts humides à feuilles larges, des forêts sèches à feuilles larges et des forêts de conifères.

Figure 2.3.1 Les principaux biomes dans le monde



Pourquoi les forêts sont-elles dépendantes du climat ?

La vie forestière et sa répartition géographique dépendent des conditions climatiques, notamment de la température de l'air et de la quantité de précipitations. Seuls certains endroits de notre planète disposent d'un climat adapté au développement des forêts. À titre d'exemple, la localisation de la limite forestière la plus au nord dépend de la température annuelle moyenne de l'air. Lorsque les températures sont trop basses, la forêt boréale est remplacée par la toundra. Toutefois, la température de l'air, notamment dans les plaines, ne change pas brusquement, mais progressivement. La limite entre la forêt et la toundra devient donc une zone de transition, où sont présents à la fois des échantillons de forêt et de toundra. Cette zone de transition est appelée la toundra forestière (Fig. 2.3.2).

La limite sud des forêts tempérées, où les forêts laissent place à des prairies (steppe) et des semi-déserts, est déterminée par la pluviométrie. Par temps chaud, les arbres et les plantes perdent constamment l'humidité de leurs feuilles afin de se procurer de la fraîcheur. En cas de faibles précipitations estivales, les réserves d'humidité du sol sont moindres, et les arbres ont des difficultés à l'acheminer jusqu'à leur cime. Lorsque l'air est chaud et que les précipitations sont limitées, les plantes herbacées de petite taille sont avantagées et le paysage se transforme en steppe.

Le relief, la qualité du sol, les étendues d'eau et l'activité humaine sont également des facteurs importants permettant de déterminer le couvert forestier. La part de forêts diminue dans les régions où la plupart des terres sont exploitées à des fins économiques.

Figure 2.3.2 Toundra forestière

Forêts des zones climatiques tempérées et subarctiques

Les **forêts boréales (taïga)** sont dominées par différentes espèces de conifères : pin, épicéa, mélèze, sapin et cèdre. Il est intéressant de constater que ces forêts en Europe et en Sibérie occidentale sont principalement composées de pins et d'épicéas, tandis qu'en Sibérie centrale et orientale elles sont principalement composées de mélèzes. Cela est dû au pergélisol présent dans les vastes territoires sibériens, qui rend ces régions particulièrement adaptées au mélèze.

Les différences de température (températures estivales moyennes, période de formation et de fonte de la couverture neigeuse) justifient la subdivision de la zone de la taïga en taïga du nord, du centre et du sud. Les arbres adultes des forêts de la taïga du nord ne poussent pas très haut et atteignent 10 à 20 m, tandis que ceux de la taïga du sud peuvent atteindre jusqu'à 50 m (Fig. 2.3.3). La taïga du centre est un intermédiaire entre le nord et le sud, non seulement sur le plan géographique, mais également en termes de hauteur moyenne des arbres, qui s'élèvent à 20 ou 25 m.

La région située au sud de la taïga est occupée par une zone de **forêts tempérées décidues** (Fig. 2.3.4). Celle-ci est dominée par diverses espèces de chênes, charmes et ormes. Ces arbres sont communément connus sous le nom de feuillus à bois dur (du fait que leur bois est relativement dur). Au sud des forêts caducifoliées, en Europe de l'Est et Asie centrale, débutent les prairies (également appelées « steppes »), la zone de transition étant appelée la **steppe boisée**. Cependant, il n'existe pas de zone de forêts de feuillus en Sibérie occidentale et dans les régions centrales d'Amérique du Nord (Fig. 2.3.1), où la taïga laisse immédiatement place aux prairies. Cela est notamment dû au climat continental de ces régions : les précipitations sont faibles, le sol est donc très sec et les forêts de feuillus, qui nécessitent beaucoup d'humidité, ne peuvent s'y développer.

Figure 2.3.3 Taïga du sud

Figure 2.3.4 Forêt de feuillus

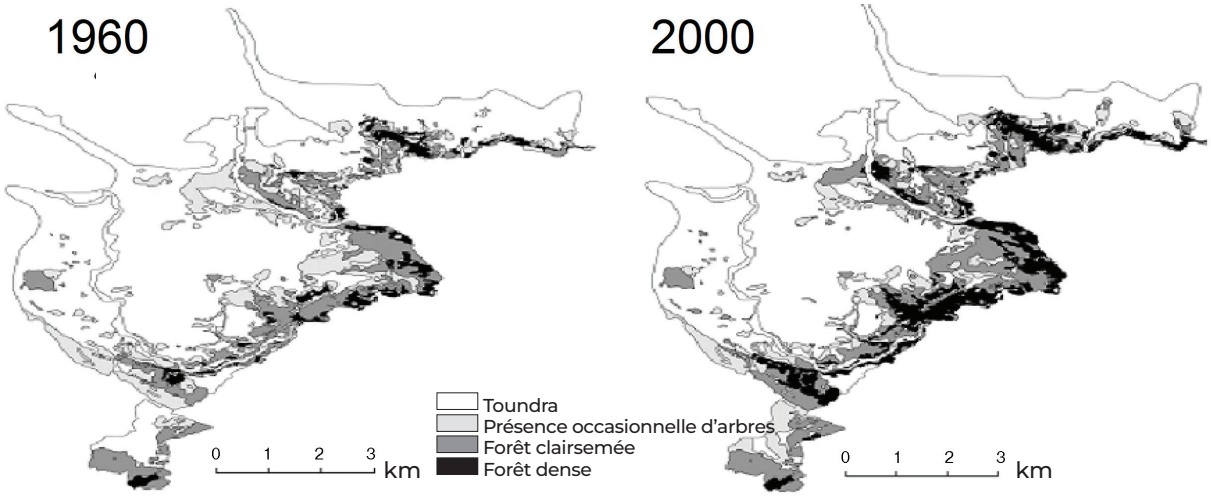
Le changement climatique qui se produit à l'heure actuelle a-t-il un impact sur les forêts ?

Les forêts sont-elles affectées par le réchauffement climatique qui se produit actuellement ? Oui, elles le sont !

Le changement climatique aura des effets très variables sur les arbres et la composition des espèces d'arbres au sein des écosystèmes forestiers. Si le climat continue de changer, les arbres devront soit s'adapter aux nouvelles conditions, soit migrer vers des régions plus adaptées.

Les changements associés au réchauffement climatique sont particulièrement visibles à la limite nord des forêts boréales. Dans les régions polaires, les arbres et les arbustes montent de plus en plus haut sur les versants des montagnes, prenant progressivement la place de la toundra de montagne (Fig. 2.3.5). La limite supérieure des mélèzes occupant les versants montagneux de la partie polaire de l'Oural (Russie) s'est déplacée de 35 à 40 m vers le haut au cours des 80 ou 90 dernières années, et de 50 à 80 m dans certaines régions. Les arbustes poussent désormais 50 m plus haut (voire plus) sur les versants des monts Khibiny de la péninsule de Kola (Russie), et une croissance intensive des arbustes, notamment des saules, a été observée dans les zones de toundra scandinaves.

Figure 2.3.5 Modification de la couverture végétale dans l'Oural polaire (Russie)



La chaleur pousse les arbres à grimper sur les montagnes en Amérique du Sud

Les arbres et les arbustes des régions montagneuses d'Amérique du Sud fuient la chaleur insupportable des plaines en grimpant sur les versants des montagnes où l'air est plus frais, assurant ainsi leur survie. Dans les Andes, les arbres se déplacent chaque année de 2 ou 3,5 m de plus en moyenne vers le haut des montagnes. C'est un exploit pour des plantes qui ne peuvent se déplacer autrement qu'en se reproduisant. Mais, le changement climatique est si rapide dans les Andes que ces arbres n'ont d'autre choix que de migrer plus 6 m plus haut chaque année pour rester à une température confortable.

Sur les 38 espèces de plantes que les scientifiques surveillent, le genre Schefflera est celui qui migre le plus rapidement de tous : il monte environ 30 m plus haut chaque année. Le figuier a peu de chance de survivre dans ces régions, car il ne grimpe qu'à un rythme de 1,5 m par an.

Les modèles climatiques suggèrent que plus de 50 % des espèces de plantes tropicales pourraient disparaître.

La limite sud des forêts tempérées est également en train de se modifier. Les forêts de chênes disparaissent progressivement des steppes boisées et des zones de steppe, notamment en raison des sécheresses estivales. Dans la région entourant le lac Baïkal, en revanche, les forêts de pins progressent vers les écosystèmes de la steppe en raison de précipitations accrues. Par conséquent, la limite sud de la forêt se déplace en raison de la modification des taux d'humidité, et non en raison de la hausse des températures.

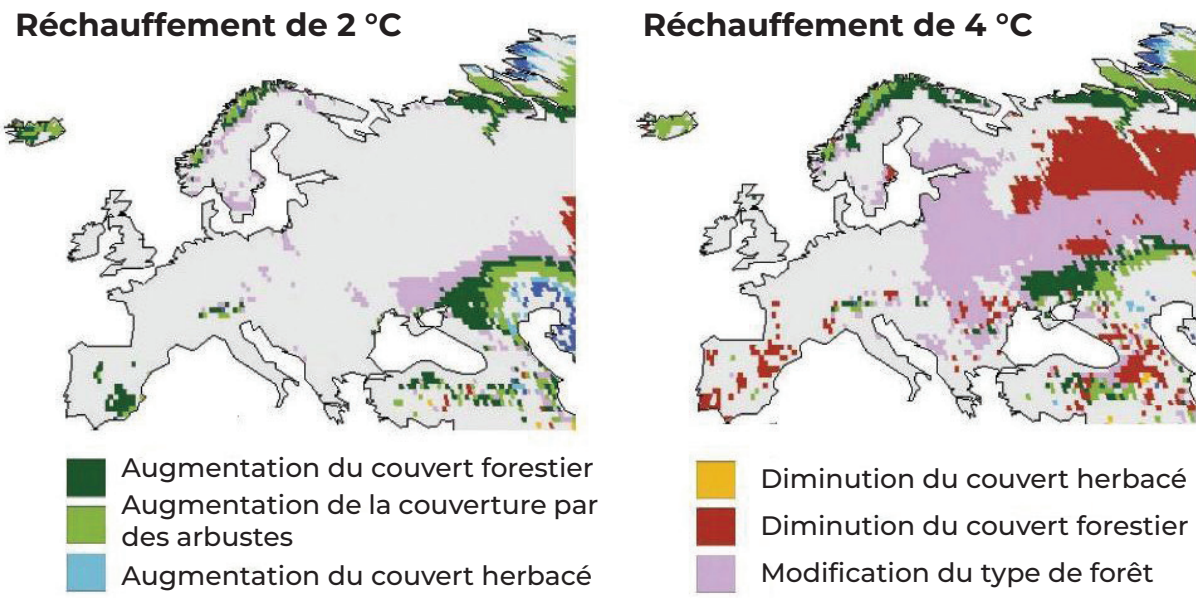
Les régions forestières russes occupées par des espèces particulières d'arbres se sont modifiées ces dernières décennies, et les scientifiques estiment que cela est principalement dû au réchauffement climatique. Par exemple, les forêts de chênes ont diminué dans les régions du sud, mais gagnent du terrain plus au nord, à la frontière entre les forêts de feuillus et la taïga du nord.

La forêt d'épicéas (Fig. 2.3.6) est en recul dans pratiquement toutes les régions de la Russie. Le système radiculaire des épicéas est proche de la surface, ce qui rend cet arbre particulièrement sensible à l'augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses. Dans le même temps, de nombreuses régions de Russie constatent une augmentation de l'étendue des forêts de bouleaux. Ce phénomène est bien connu des spécialistes de la sylviculture : cela vient du fait qu'après un incendie ou la chute de conifères, bouleaux et autres espèces de feuillus apparaissent d'abord à leur place, et qu'un certain laps de temps est nécessaire avant que de nouveaux conifères apparaissent et commencent à remplacer les bouleaux, les trembles et les aulnes. Cependant, au cours des dernières décennies, cette dernière étape n'a pu voir le jour : les conifères semblent incapables de regagner le terrain laissé aux forêts de bouleaux.

Figure 2.3.6 Forêt d'épicéas

La plupart des prévisions avancent que les régions du nord de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord seront davantage affectées par le réchauffement climatique que les autres forêts du monde, car les limites nord et sud de leur implantation se déplacent. Une augmentation des températures de 2 °C entraînera une augmentation de l'étendue du couvert forestier en Europe en raison de la progression de la taïga vers l'actuelle zone de toundra. Néanmoins, une augmentation des températures de 4 °C entraînera un recul de la limite sud de la forêt vers le nord, effet qui sera bien plus marqué que la progression vers le nord en direction de la toundra (Fig. 2.3.7).

Figure 2.3.7 As follows Changements prévus concernant le couvert forestier en Europe d'ici 2100, en supposant un réchauffement climatique de 2 °C et de 4 °C



La déforestation due au changement climatique aura une incidence sur la quasi-totalité de l'Europe de l'Est et de la Sibérie occidentale. Ces prévisions sont alarmantes et montrent à quel point la disparition des forêts pourrait être un problème sérieux si, dans le pire des scénarios, le réchauffement climatique se poursuivait.

Destruction des forêts par les incendies, les parasites et les phénomènes météorologiques extrêmes

Autre menace majeure pour les forêts associée au changement climatique, les incendies de grande envergure et les attaques de parasites provoqués par les températures estivales élevées. La chaleur et d'autres phénomènes météorologiques extrêmes sont souvent directement responsables de la destruction des forêts.

Les incendies de forêts sont généralement provoqués accidentellement par l'homme. Mais ils ne peuvent se déclencher que dans certaines conditions, notamment lorsque le temps demeure chaud et sec pendant un certain nombre de jours ou de semaines. Le tapis forestier composé de feuilles mortes, d'aiguilles de pin, de petites branches, de mousse, de lichens et d'herbes poussant sous le couvert forestier s'assèche alors et prend facilement feu, permettant ainsi aux incendies de se répandre sur de vastes étendues. On appelle cela un feu de profondeur.

Lorsque l'incendie se propage aux forêts de conifères, il atteint souvent la cime des arbres. Les aiguilles de pin et les petites branches des sapins et des pins contiennent de grandes quantités de substance résineuse, par conséquent les arbres vivants prennent aisément feu. Le feu de cimes est plus dangereux et plus destructeur, et peut entraîner la destruction complète d'une forêt entière (Fig. 2.3.8).

Les incendies causent d'importants dommages aux forêts : un grand nombre d'arbres périssent, leur croissance est ralentie, la variété des arbres de la forêt s'appauvrit, et la propagation des insectes parasites est facilitée. Avec le changement climatique, le risque d'incendies de forêts augmente, car les températures plus élevées assèchent plus rapidement les matériaux ligneux. La saison chaude, durant laquelle les incendies se produisent, dure également plus longtemps.

Figure 2.3.8

Incendie de forêt

Les étés exceptionnellement chauds ayant sévi en 2010 et 2012 au centre de la Russie européenne a affaibli les conifères, qui étaient habitués à des conditions très différentes. Les arbres ainsi affaiblis constituent donc une proie facile pour les espèces d'insectes qui vivent sous leur écorce. Lorsque les températures et les niveaux d'humidité sont normaux, les populations de ces insectes sont contrôlées par d'autres espèces (insectes et oiseaux prédateurs). Toutefois, si la population de dendroctones devient trop importante, de vastes étendues de forêt pourraient périr ! Les arbres desséchés perdent d'abord leurs aiguilles, puis leur écorce. Divers champignons attaquant le bois s'attaquent aux racines, qui ne sont alors plus en mesure de supporter les arbres. Un vent fort peut alors abattre les arbres, les uns après les autres (Fig. 2.3.9). Les oiseaux d'abord, puis les écureuils, désertent la forêt dont ils ne peuvent plus recueillir les pommes de pin. Les martes migrent également ailleurs, à la recherche d'un meilleur endroit où chasser. Le tapis forestier de la forêt, composé de muguet et d'oxalis, qui fleurissent grâce à la protection contre la lumière directe du soleil offerte par les arbres, est remplacé par du calamagrostis, des framboisiers et des orties. En bref, l'aire de répartition des espèces est entièrement modifiée.

Tout n'est pas perdu : les espèces délogées peuvent revenir. Comme souvent après un grave incendie, une forêt d'épicéas se reconstituera intégralement au bout d'un ou deux siècles. Mais uniquement à condition que cette forêt soit demeurée intacte ailleurs, avec l'ensemble de ses habitants, et que les variations anormales de température ne se reproduisent plus.

Plus récemment, en septembre 2021, des incendies ont détruit plus de 18,16 millions d'hectares de forêt russe, établissant un record absolu depuis que le pays a commencé à surveiller les incendies de forêt à l'aide de satellites en 2001. Le précédent record avait été établi en 2012, lorsque les incendies couvraient 18,11 millions d'hectares de forêt.

D'autres phénomènes météorologiques extrêmes (vents violents et tornades) peuvent détruire les forêts au même titre que la sécheresse, en déracinant les arbres (Fig. 2.3.10).

Les fortes pluies peuvent également causer d'importants dommages en emportant le sol avec elles ou bien tuer les arbres du fait d'un engorgement trop prolongé du sol. Les fortes chutes de neige humide et la formation de glace à grande échelle contribuent également à endommager les arbres, les fortes averses de grêle endommagent l'écorce de leurs branches, ce qui affaiblit l'arbre et le conduit à se dessécher.

Figure 2.3.9 **Épicéa déraciné après la sécheresse de 2010**

Ouragan à Kostroma, Russie

En juin 2010, la région de Kostrama et les régions voisines, en Russie, ont été confrontées à des vents violents soufflant de 70 à 90 km/h. Des maisons et des immeubles ont été endommagés, des lignes électriques ont été arrachées, et des arbres déracinés ont provoqué des accidents dans les villes et les villages. Les plantations forestières de la région de Kostroma ont été lourdement endommagées (Fig. 2.3.10). Les chercheurs de l'Université d'État de Kostroma estiment que 21 000 hectares de forêt ont été détruits.

Figure 2.3.10 **Les conséquences des vents violents dans la région de Kostroma**

L'histoire de la glaciation, les preuves et les prévisions scientifiques actuelles démontrent que les forêts et autres écosystèmes naturels sont capables de s'adapter à la plupart des bouleversements climatiques. Toutefois, cette adaptation est principalement liée à la migration, c'est-à-dire à la modification des limites des zones naturelles et des types de végétation. Durant les périodes de glaciation, les forêts n'ont survécu que sur des territoires relativement restreints, et de vastes étendues de l'Eurasie ont été recouvertes par la toundra et la steppe-toundra. Lorsque le climat s'est réchauffé, la forêt a regagné sa position de type de végétation dominant. Cependant, le réchauffement climatique actuel est beaucoup trop rapide, laissant présager une modification, non pas progressive mais dramatique, des types de végétation, qui entraînera un assèchement à grande échelle des zones forestières, avec un risque élevé d'incendies de forêt.

Il est donc très important de ne pas laisser le réchauffement climatique atteindre des extrêmes, et d'œuvrer à une stabilisation progressive du changement climatique sur la planète.

Comment les forêts influencent-elles le climat ?

Nous savons désormais quels sont les effets du climat et du changement climatique sur les forêts. Mais la relation est à double sens : les forêts ont une influence sur le climat !

À titre d'exemple, les vertes forêts modifient la quantité de soleil réfléchie par la surface de la Terre, ce qui affecte la quantité de chaleur absorbée par la Terre. La différence de température entre les zones forestières et les zones dépourvues de forêt est particulièrement notable en hiver. Les rayons du soleil sont réfléchis par les plaines enneigées et dépourvues d'arbres, tandis que les espaces sombres des forêts boréales réfléchissent moins et absorbent davantage la lumière du soleil.

Les forêts aident à conserver l'humidité du sol et affectent son évaporation, rendant le climat régional plus doux et plus humide.

La couverture neigeuse se maintient plus longtemps en forêt, ce qui atténue les brusques changements de température qui surviennent au printemps, et réduit le risque de crue des fleuves.

Mais la raison pour laquelle les forêts sont particulièrement importantes pour le climat, c'est le cycle du carbone. Le dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère par la combustion de combustibles fossiles est la principale cause du réchauffement climatique qui se produit à l'heure actuelle. Les forêts jouent un rôle essentiel en absorbant le dioxyde de carbone de l'atmosphère et en retenant le carbone sous la forme de diverses substances organiques.

Vous savez probablement que les plantes vertes absorbent le dioxyde de carbone et produisent de l'oxygène. Ce processus s'appelle la photosynthèse, et il est alimenté par l'énergie du soleil. Les forêts représentent une dense concentration de plantes vertes (arbres, arbustes et herbe) et sont généralement considérées comme vitales pour l'enrichissement en oxygène de l'atmosphère de notre planète. Les forêts sont souvent décrites, à la télévision et dans la presse, comme « les poumons verts de la planète ». L'absorption du dioxyde de carbone et l'émission d'oxygène sont les deux phases du processus unique de photosynthèse, vous pourriez donc être amené à penser que les forêts peuvent supprimer le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. Mais cela n'est pas si simple. Pour bien comprendre le processus d'échange de dioxyde de carbone entre la forêt et l'atmosphère, nous devons d'abord comprendre comment la forêt emmagasine le carbone (élément qui s'unit à l'oxygène pour former le dioxyde de carbone). Toutes les substances organiques contiennent du carbone. Par exemple, près de la moitié du poids du bois mort est imputable au carbone.

Qu'est-ce que le réservoir de carbone ?

Toute partie de l'écosystème contenant des quantités significatives de matière organique constitue une réserve de carbone. Les scientifiques qualifient ces réserves de **« réservoirs de carbone »**. Il existe quatre principaux réservoirs de carbone dans l'écosystème forestier : 1) la phytomasse ou biomasse (le poids des plantes vivantes) ; 2) le bois mort ; 3) la litière (feuilles et branches mortes sur le tapis forestier), 4) la matière organique du sol. Dans de nombreux pays il existe un réservoir beaucoup plus réduit, appelé produits du bois récoltés.

Le **réservoir de la phytomasse** est composé de plantes vivantes : les troncs, branches, racines, feuilles et aiguilles des arbres et des arbustes, les brins et racines d'herbe et la mousse (Fig. 2.3.11). En règle générale, les troncs d'arbres représentent la plus grande partie de la phytomasse, mais la mousse en constitue également une partie importante dans les forêts de pins marécageuses et les forêts boréales du Nord.

Le **réservoir de bois mort** est composé de racines et d'arbres morts. La mort des arbres de la forêt est appelée l'« attrition » et survient généralement naturellement lorsque les arbres en croissance rivalisent les uns avec les autres dans leur recherche du soleil. Les arbres les plus petits sont laissés dans l'ombre par les arbres plus grands et dépérissent progressivement car ils ne reçoivent pas suffisamment de lumière pour assurer leur processus de photosynthèse. C'est la raison pour laquelle les jeunes forêts sont beaucoup plus épaisses que les anciennes forêts. Néanmoins, l'attrition peut également survenir dans diverses autres situations : elle peut être provoquée par des incendies de forêt, des sécheresses, des attaques de parasites et par la pollution causée par l'homme. Dans les forêts affectées par un ou plusieurs de ces mécanismes, le réservoir de carbone du bois mort peut être supérieur au réservoir du bois vivant.

La litière est constituée de fragments relativement petits de matière organique se trouvant à la surface du sol (Fig. 2.3.13). Elle se compose principalement de feuilles mortes et d'aiguilles de pin, de brindilles sèches, de pétales de fleurs, de pommes de pin et d'autres fragments tombés de plantes vivantes. Dans les forêts caducifoliées, le réapprovisionnement du **réservoir de la litière** est plus soutenu à l'automne, durant la chute des feuilles, tandis que dans les forêts boréales, celui-ci intervient de manière plus uniforme au fil des saisons.

Figure 2.3.11

Le bois des troncs d'arbres est la plus importante composante du réservoir de carbone de la phytomasse

Figure 2.3.12

Les arbres morts font partie du réservoir de carbone du bois mort

Figure 2.3.13

Le réservoir de carbone de la litière grossit à l'automne, avec la chute des feuilles

Le réservoir du sol de la forêt renferme des quantités significatives de carbone. Le sol est composé d'un mélange de minéraux et de matière organique, principalement de l'**« humus »**, qui est une substance sombre créée par la décomposition progressive des résidus végétaux (litière, bois mort et racines mortes). Le carbone représente 58 % de la composition de l'humus, ce qui est une proportion plus élevée que dans la phytomasse. Plus le sol est foncé, plus il contient de carbone (Fig. 2.3.14).

Le carbone stocké dans les produits ligneux est souvent appelé **réservoir de carbone des produits ligneux récoltés**. Certains produits du bois, tels que les meubles en bois de haute qualité et les bâtiments à ossature de bois, peuvent retenir le carbone plus longtemps que si l'arbre avait été laissé dans la forêt. Les produits du bois sont importants pour aider à stocker le carbone forestier existant, tandis que la récolte contribue à donner de l'espace aux arbres de remplacement.

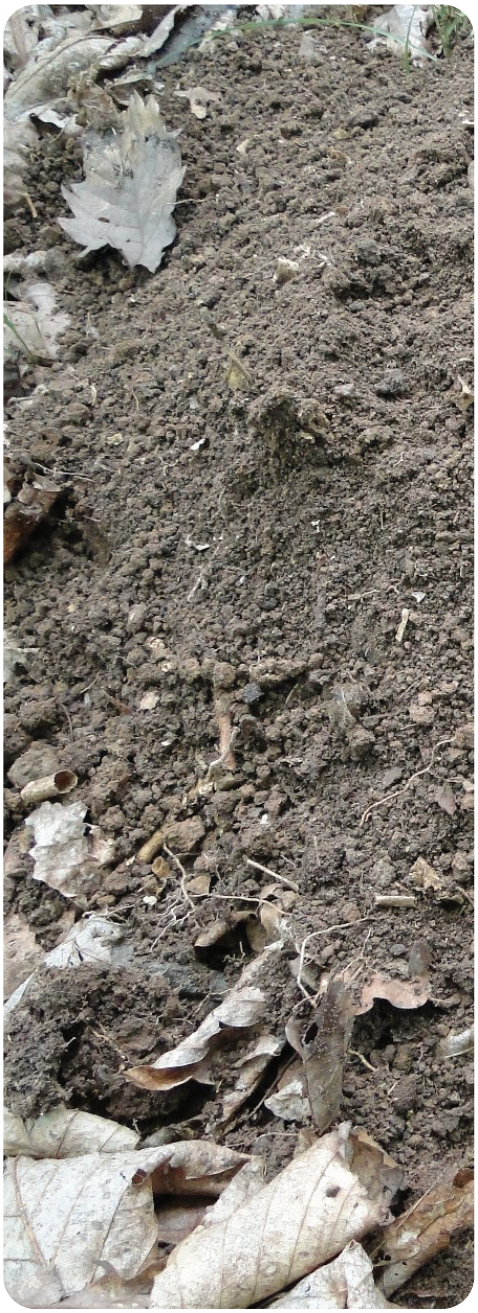
Dans les forêts boréales, la phytomasse contient 21 % de la réserve de carbone, le bois mort 4 %, la litière 3 %, et 72 % se trouve dans le sol. Dans ces forêts, le carbone est donc concentré dans le sol.

Ces proportions sont très différentes dans les forêts tropicales, où la matière organique vivante et morte compte 50 % de carbone.

Pourquoi une telle différence ? Dans les forêts boréales, la plupart des plantes mortes se décomposent sous l'effet des champignons et des bactéries, un processus relativement lent. Il faut plusieurs décennies pour que les troncs des arbres morts de grande taille disparaissent. Ainsi, les forêts accumulent de grandes quantités de matière organique morte (bois mort, litière et humus du sol). Dans les forêts tropicales, une grande partie de la litière et du bois mort est consommée par les animaux, notamment les termites. Cela accélère la vitesse de décomposition et réduit la contribution de la matière organique morte à la quantité totale de carbone présente dans l'écosystème.

Figure 2.3.14

Si le sol est foncé, il contient une grande quantité de carbone



Budget carbone

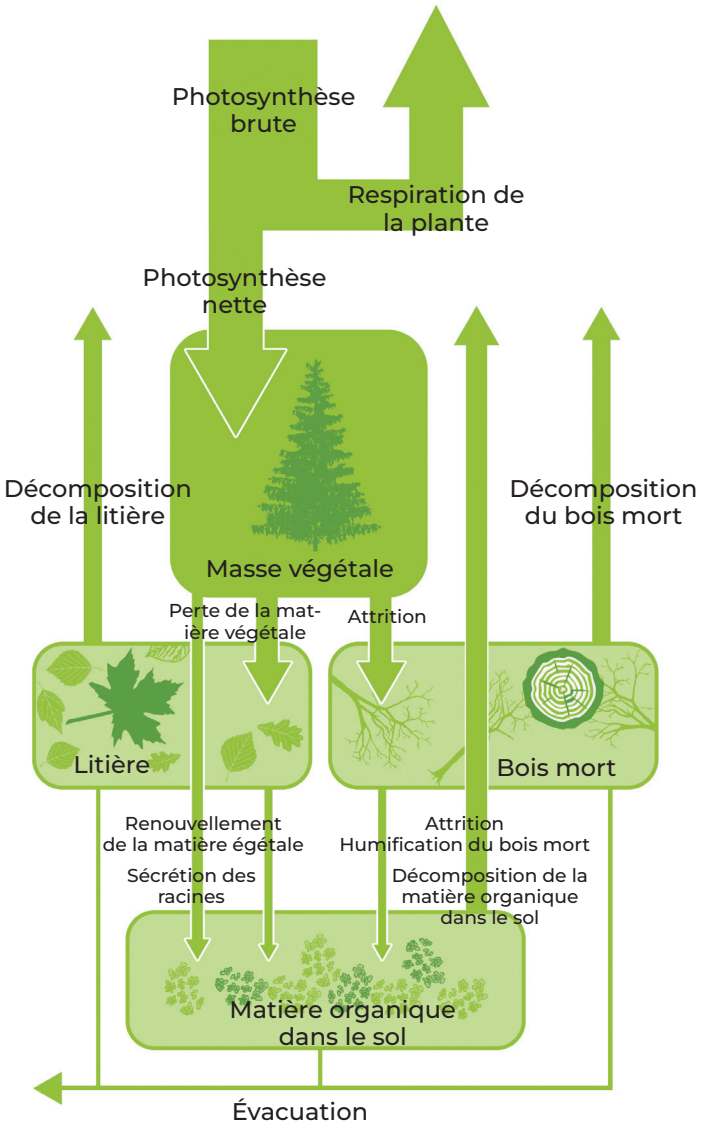
Maintenant que nous savons tout au sujet des réservoirs de carbone présents dans l'écosystème de la forêt, voyons de quelle façon ces réservoirs sont reliés entre eux, ainsi qu'à l'atmosphère (Fig. 2.3.15). Les scientifiques appellent ce système de connexions le **« budget carbone »**, car celui-ci est semblable au budget financier d'un pays, d'une société ou d'une famille, où les entrées (revenus) doivent être comparées aux sorties (dépenses).

Le seul « élément de revenu » dans l'écosystème forestier est la photosynthèse. Le résultat de la photosynthèse crée une substance organique. Les premiers consommateurs de cette substance sont les plantes elles-mêmes : près de la moitié de la substance créée par la photosynthèse est utilisée par les plantes lorsqu'elles respirent, renvoyant ainsi le carbone de la substance dans l'atmosphère. Le reste de la substance est appelé la « photosynthèse nette » : elle réapprovisionne le réservoir de la phytomasse.

Les divers organismes vivants peuplant une forêt consomment la matière vivante des plantes : chenilles et autres insectes se nourrissant des feuilles des arbres ; oiseaux et rongeurs récupérant les fruits et les semences, et ongulés mangeant l'herbe et les jeunes branches.

Figure 2.3.15

Le budget carbone d'un écosystème forestier



Dans la taïga et dans les forêts tempérées, une grande partie de la vie végétale meurt naturellement (quand une plante dépérit et meurt complètement ou lorsqu'elle perd ses feuilles et ses brindilles) et est ensuite consumée par les champignons et les bactéries (Fig. 2.3.16). Cela réapprovisionne les réservoirs de carbone du bois mort et de la litière.

Lorsque les champignons et les bactéries respirent, **l'humification carbonée** des sécrétions de la litière produites par les racines de la matière organique se lie à l'oxygène et retourne dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone. Cela intervient lorsque le bois mort et la litière se décomposent. Une part infime de ces réservoirs est transformée en humus et vient réapprovisionner le réservoir de carbone du sol (on parle d'humification). Le carbone pénètre également dans le sol par l'intermédiaire des plantes vivantes, sous forme de substances organiques sécrétées par les racines.

La matière organique du sol est également décomposée par les champignons et les bactéries, et donne donc lieu à un rejet de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Une partie du carbone est évacuée de l'écosystème par les eaux souterraines et de surface : vous avez certainement déjà vu les feuilles d'automne être emportées par les ruisseaux des forêts.

Les forêts composées d'arbres matures et anciens absorbent autant de dioxyde de carbone de l'atmosphère qu'elles en rejettent. Les réservoirs de carbone de ces forêts demeurent constants. Ils sont tels des piscines : plein à ras bord et incapables de contenir plus d'eau, sauf qu'ils sont plein à ras bord de carbone et non pas d'eau. Cela ne signifie pas pour autant que les forêts matures ne jouent pas de rôle dans la régulation de la composition gazeuse de l'atmosphère. Le fait est qu'elles n'absorbent plus activement le carbone, et sont plutôt devenues les gardiennes du carbone « stocké », à savoir du carbone qui ne contribue plus à l'effet de serre.

Le budget carbone des jeunes forêts en pleine croissance est différent de celui des forêts matures. Les jeunes forêts accumulent du carbone, en l'éliminant de l'atmosphère. Ce carbone s'accumule dans des réservoirs. Par conséquent, seules les jeunes forêts méritent leur nom de « poumons verts » de la planète.

Figure 2.3.16 **L'amadouvier décompose le bois mort et renvoie le carbone dans l'atmosphère**

Différences dans l'incidence qu'ont les forêts sur l'atmosphère

Comme nous l'avons vu, les forêts jeunes et anciennes fonctionnent différemment : les jeunes forêts en pleine croissance absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère et peuvent ainsi partiellement compenser les émissions de ce gaz résultant de la combustion de charbon, de gaz et de pétrole. Les forêts matures stockent de grandes quantités de carbone sous forme liée, empêchant ainsi la formation de dioxyde de carbone susceptible de contribuer à l'effet de serre. Par conséquent, si nous souhaitons utiliser la forêt comme moyen de lutter contre le changement climatique, il nous faut : 1) planter de nouvelles forêts, là où aucune autre forêt n'existait auparavant ; 2) prendre bien soin des forêts existantes.

Les pays développés (États-Unis, pays de l'Union européenne, Russie et autres) comptent beaucoup de jeunes forêts, qui absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère. L'économie de ces pays étant déjà complètement formée, les forêts n'y sont plus détruites pour les besoins industriels de l'homme. Ces dernières décennies, de nombreux pays (USA, Canada, pays de l'Union européenne et autres) encouragent également les propriétaires terriens à planter de nouvelles forêts.

Étant donné que les forêts boréales et tempérées grandissent et absorbent du carbone depuis de nombreuses décennies, voire parfois depuis plusieurs centaines d'années, le carbone s'accumule désormais grâce au renouvellement de la forêt dans de nombreux endroits où le couvert forestier avait été fortement réduit durant l'industrialisation du siècle dernier. La reconstitution de la forêt de pins le long de la côte pacifique du Canada en est un exemple probant.

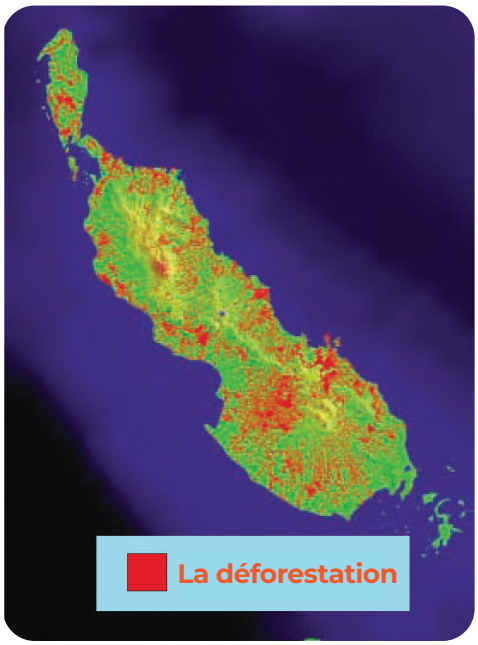
Au début du XX^{e} siècle, ce territoire était recouvert d'immenses forêts de sapins de Douglas et de cèdres rouges, dont certains s'élevaient à 80 ou 90 m. Au milieu du XX^{e} siècle, ces forêts ont été abattues, toutefois on peut encore observer les immenses souches des arbres ainsi abattus, de plus de 2 m de diamètre. Depuis, des lois environnementales strictes ont été adoptées au Canada ont permis la reconstitution de forêts dans d'anciennes zones d'exploitation forestière.

Figure 2.3.17

Cette énorme souche d'arbre dans la forêt de l'Ouest canadien (Colombie-Britannique) témoigne de l'exploitation intensive des arbres au cours de la première moitié du XX^{e} siècle

Figure 2.3.18

Réduction du couvert forestier sur l'île de Bougainville (Papouasie-Nouvelle-Guinée), 1972-2002



La situation est bien différente dans les pays en développement, notamment en Amérique du Sud, en Asie du Sud-Est et en Océanie. La population et l'économie de ces pays est en plein essor, ce qui augmente le besoin de terres pour l'agriculture, l'industrie, les villes et les villages, et les routes. Ces terres proviennent principalement de la destruction de forêts tropicales, et aucune nouvelle forêt n'est plantée pour absorber le dioxyde de carbone. Une photo prise dans la partie tropicale de l'Argentine (Fig. 2.3.19) montre le début de la déforestation. Ce territoire forestier appartenait auparavant à l'armée, mais a été cédé au gouvernement local au début des années 2000. Le gouvernement local a donné l'autorisation d'exploiter le terrain à des fins agricoles, et les arbres ont commencé à être abattus.

La déforestation se produit très rapidement dans certaines régions tropicales. La déforestation en Papouasie-Nouvelle-Guinée est étendue et se produit à un rythme de 1,4 % de la forêt tropicale humide perdue chaque année. L'exploitation forestière illégale est la principale cause de la déforestation, contribuant à 70 à 80 % de toutes les exportations de bois. Entre 1972 et 2002, le pays a perdu plus de cinq millions d'hectares de forêts, derrière le Brésil et l'Indonésie parmi les pays tropicaux (Fig. 2.3.18). En conséquence, les émissions de gaz à effet de serre dues à la déforestation en Papouasie-Nouvelle-Guinée ont plus que doublé au cours de cette période de 30 ans. Grâce aux efforts de conservation de la forêt tropicale, le rythme de la déforestation a récemment ralenti pour atteindre une moyenne de 0,5 % par an.

Environ 10 % du dioxyde de carbone actuellement émis dans l'atmosphère par les activités humaines résultent de la destruction de la forêt tropicale.

Le programme des Nations Unies, Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+), est une étape vers un système mondial visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre causées par la déforestation dans les pays en développement. Des projets internationaux bilatéraux visant à préserver les forêts tropicales sont mis en place (un accord entre le Brésil et la Norvège, et l'Australie et l'Indonésie, par exemple). Certains pays en développement, comme la Chine, l'Inde et le Costa Rica, disposent de leurs propres programmes d'augmentation de la superficie de leurs forêts. Malgré tout, la rapide libération des stocks de carbone découlant de la destruction des forêts tropicales demeure fort préoccupante.

Figure 2.3.19 **Un ancien territoire forestier en Argentine (province d'Iguazu).**

La disparition des forêts tropicales

Les forêts tropicales figurent parmi les écosystèmes les plus importants de la planète. Leur écosystème est le plus riche au monde en termes de diversité des espèces. Les forêts tropicales sont une source de bois, de nourriture et de matières premières pour les médicaments. Elles jouent également un rôle très important dans la régulation du climat de la Terre. La disparition des forêts tropicales entraîne la disparition de la couche fertile du sol, la disparition de la biodiversité et une rupture de l'équilibre écologique sur de vastes étendues.

Malgré tous les efforts déployés jusqu'à ce jour, les forêts tropicales continuent de disparaitre à un rythme très rapide, notamment en Amérique du Sud et en Afrique. Les pertes enregistrées de 2005 à 2010 ont été d'environ 3,6 millions d'hectares en Amérique du Sud et de 3,4 millions d'hectares en Afrique. Aujourd'hui, les forêts tropicales ne couvrent que 5 % de la surface de la Terre, contre 12 % cent ans auparavant. Une parcelle de forêt plus large que la totalité de l'Angleterre (130 000 km^2) est abattue ou brûlée chaque année.

Fait encourageant, la déforestation a diminué et la couverture forestière nette a augmenté depuis 2010. Les initiatives gouvernementales et les moratoires internationaux ont réussi à réduire la déforestation en Amazonie entre 2004 et 2015, tandis que la repousse des forêts s'est produite en Europe, en Eurasie et en Amérique du Nord. Mais maintenir les taux de déforestation à un faible niveau est un défi, compte tenu de l'augmentation des taux de déforestation au cours des quatre dernières années en Amazonie et ailleurs.

L'une des principales causes de la déforestation est la transformation de la forêt en terres agricoles afin de nourrir une population mondiale croissante. Les forêts tropicales sont souvent remplacées par des plantations de caféiers, cocotiers ou hévéas. Les exploitations minières non contrôlées représentent également une menace pour les forêts tropicales d'Amérique du Sud. Ce sont toutes les principales causes de la perte des forêts tropicales, détruisant certains des endroits les plus riches en biodiversité de la planète, abritant des espèces telles que des jaguars, des paresseux, des orangs outans, des toucans et des lémuriens. Une telle déforestation pourrait être irréversible. Si la déforestation se limitait à une petite superficie, la forêt pourrait alors se re-développer dans cette zone après quelques années, mais si de larges pans de forêt sont abattus, celle-ci pourrait ne jamais réapparaître : les fortes pluies emporteraient les nutriments essentiels du sol et le soleil brûlerait la couche supérieure du sol, de sorte que seules des mauvaises herbes pourraient y pousser..

Que peut-on faire pour sauver les forêts ? Tout d'abord, les pays pauvres bénéficiant d'importantes zones de forêt tropicale (essentiellement le Pérou, l'Équateur et l'Indonésie) doivent être encouragés à mener d'autres activités économiques, qui n'impliquent pas la destruction de la forêt. Sinon, la destruction des arbres se poursuivra à des fins d'exploitation minière et de production alimentaire.

Les incitations économiques et les réglementations peuvent contribuer à réduire la déforestation et à prévenir la perte des forêts. Le Brésil a connu un succès considérable dans la réduction de la déforestation en Amazonie à la fin des années 2000 et au début des années 2010. Les lois environnementales, un nouveau code forestier, une meilleure surveillance de l'exploitation forestière illégale sur brûlis et un moratoire sur le soja en Amazonie ont été à l'origine de cette chute. Cependant, depuis lors, la déforestation a fortement augmenté dans la plus grande forêt tropicale du monde en raison du manque d'application des lois. De même, le récent succès de l'Indonésie dans le ralentissement de la déforestation grâce à un moratoire sur l'expansion de l'huile de palme est fragile pour les mêmes raisons : les incitations économiques au défrichement des forêts n'ont pas changé.

Comment gérer le bilan carbone des forêts et aider les forêts à s'adapter au changement climatique

Le bilan carbone des forêts dépend de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont l'impact de l'homme, les catastrophes naturelles (incendies de forêts, attaques de parasites, etc.) et le changement climatique. Le bilan carbone des forêts peut être géré : si la déforestation à des fins d'exploitation et autre est réduite, les forêts absorberont davantage de carbone atmosphérique.

Un tel projet a été lancé dans l'Extrême-Orient de la Russie, dont l'objectif est de mettre fin à l'exploitation forestière à grande échelle dans les forêts de cèdres et de feuillus du bassin du fleuve Bikin, où seuls les habitants locaux seront autorisés à couper du bois (Fig. 2.3.20). Le projet encourage les résidents locaux à développer des formes traditionnelles de gestion forestière : collecte des pignons de pin, baies, champignons, fougères et herbes.

Il est également essentiel de réduire les dommages causés par les incendies de forêts, dont la plupart sont provoqués par des personnes oubliant d'éteindre des barbecues sauvages, jetant leurs mégots de cigarette sur la litière sèche ou le lichen, mettant le feu de l'herbe sèche (Fig. 2.3.21), autant d'actions pouvant être considérées comme « imprudentes avec le feu ». Nous avons tous été avertis de la nécessité de « protéger la forêt des incendies », mais cet avertissement revêt un nouveau caractère d'urgence face au changement climatique. Si vous parvenez à convaincre vos amis de ne pas brûler les herbes sèches ou de ne pas mettre le feu à des substances pelucheuses en été, et à éteindre soigneusement le feu de camp après une sortie familiale en forêt, vous saurez fait votre part pour lutter contre le changement climatique !

Figure 2.3.20

Forêt de cèdres et de feuillus dans le bassin du fleuve Bikin

Figure 2.3.21

Brûlage d'herbe sèche, allumé par l'homme

En général, les scientifiques font la distinction entre l'adaptation se référant aux forêts naturelles et celle aux forêts aménagées. L'adaptation des forêts naturelles comprend des mesures de conservation, de protection et de restauration. Dans les forêts gérées, les options d'adaptation comprennent la gestion durable des forêts, la diversification et l'ajustement de la composition des espèces d'arbres pour renforcer la résistance, et la gestion des risques accrus liés aux ravageurs, aux maladies et aux incendies de forêt. La gestion forestière est une stratégie populaire pour faire face à la sécheresse, réduire les risques d'incendie et préserver la biodiversité des paysages et les emplois ruraux. La restauration des forêts naturelles et des tourbières asséchées et l'amélioration de la durabilité des forêts gérées renforcent la résistance des stocks et des puits de carbone.

L'AR6 du GIEC note que les stratégies d'adaptation réussies pour les forêts d'Europe et de Russie incluent la modification de la composition des espèces d'arbres pour améliorer la résistance des forêts. La diversification des espèces d'arbres et l'augmentation des zones de conservation réduisent la vulnérabilité aux ravageurs et aux agents pathogènes, renforcent la résistance aux perturbations naturelles et peuvent augmenter la séquestration du carbone, la biodiversité et la qualité de l'eau. Les approches de gestion active peuvent limiter l'impact des incendies sur la productivité forestière. Il s'agit notamment du reboisement, de la gestion de la réduction des combustibles, du brûlage dirigé, du passage des conifères aux espèces de feuillus moins inflammables, de la recréation de forêts mixtes et de l'agroforesterie.

QUESTIONS

1. Qu'est-ce que la taïga ou forêt boréale ?

2. Quelles sont les espèces d'arbres dominantes dans la taïga de Sibérie orientale et pourquoi dominent-elles ?

3. Comment la limite de la toundra forestière s'est-elle déplacée durant les dernières décennies et pourquoi ?

4. Si les températures augmentent de 4 °C avant la fin de ce siècle, comment cela affectera-t-il les forêts ?

5. Quel est l'impact des activités humaines sur les forêts ?

6. Quels sont les principaux réservoirs de carbone présents dans l'écosystème forestier ?

7. Les plantes respirent-elles ?

8. Quels sont les organismes qui assurent la décomposition des résidus végétaux ?

9. Les forêts matures et anciennes peuvent-elles absorber l'excédent de dioxyde de carbone de l'atmosphère ?

10. Pourquoi les forêts tropicales perdent-elles leurs réserves de carbone ?

11. Quels types de mesures d'adaptation au climat, mentionnées dans ce chapitre et dans d'autres, sont recommandées pour faire face aux impacts climatiques sur les forêts européennes et russes ?

EXERCICES

1

Expérience
Objectif : Identifier les arbres et les arbustes les plus sensibles au réchauffement climatique.
Matériel : branches d'arbres (avant l'apparition des feuilles), vases contenant de l'eau.

L'expérience : L'expérience est à réaliser quelques semaines avant la fonte habituelle de la neige dans votre région. Coupez les branches de plusieurs arbres et arbustes (bouleau, orme, saule, peuplier, érable) dehors. Mettez les branches dans un vase rempli d'eau, et observez-les régulièrement. Notez de quelle manière les bourgeons évoluent, le moment où ils s'ouvrent et la manière dont la feuille pousse. Observez également de quelle manière se développent les bourgeons sur les arbres dehors. Une fois que les feuilles sont apparues sur les arbres dehors, tracez un graphique pour déterminer la croissance des bourgeons et des feuilles à l'intérieur et à l'extérieur. Vous découvrirez alors quelles sont les trois espèces les plus sensibles à un environnement plus chaud (lesquelles réagissent plus vite à la chaleur).

2

Expérience
Objectif : Déterminer quelles sont les trois espèces qui contiennent le plus de carbone dans leur bois.
Matériel : Morceaux de différents types de bois (chêne, épicéa, bouleau, tremble et autres), une règle, une balance.

L'expérience : Mesurez chaque morceau de bois pour calculer son volume (multipliez la longueur par la largeur par la hauteur) et pesez-le. Divisez le poids de chaque morceau par son volume afin de déterminer combien de grammes pèse un morceau de bois dont les côtés font 1 cm. Divisez le résultat par 2 et vous obtiendrez le poids du carbone contenu dans le morceau de bois. Discutez des résultats et décidez laquelle des trois espèces possède le plus gros réservoir de carbone. Vous pourrez ensuite déterminer quelle espèce planter pour réduire l'effet de serre.

3

Expérience
Objectif : Comparer la quantité d'oxygène et de dioxyde de carbone émise par les plantes à la lumière et dans l'obscurité.
Matériel : Deux gros récipients en verre munis de couvercles étanches et contenant de l'eau (environ un tiers du volume de chaque récipient), des boutures de plantes à larges feuilles, une bûchette, des allumettes.

L'expérience : Placez une bouture de plante dans chaque pot et fermez-le. Mettez un récipient à un endroit chaud et lumineux, et couvrez l'autre avec un linge filtrant la lumière. Au bout de 1 ou 2 jours, mettez le feu à une bûchette et utilisez-la afin de déterminer dans lequel des récipients la flamme brûle davantage : faites-le immédiatement après avoir retiré le couvercle et jusqu'à ce que le gaz à l'intérieur du récipient se soit dissipé. Notez l'éclat lumineux de la flamme sur la bûchette lorsque vous l'avez mise dans le récipient « lumineux » immédiatement après avoir retiré le couvercle, et notez comme la flamme s'est atténuée lorsque vous l'avez mise dans le récipient « obscure ». La conclusion est que la plante produit plus d'oxygène que de dioxyde de carbone lorsqu'elle est exposée à la lumière, mais plus de dioxyde de carbone que d'oxygène lorsqu'elle se trouve dans l'obscurité.

2.4 Les effets du changement climatique sur les ressources en eau

L'eau dans le milieu naturel

L'eau occupe une place particulière parmi le grand nombre de composés chimiques que l'on peut trouver sur notre planète. Elle coule du robinet, nous la faisons bouillir et elle remplir les rivières, les lacs, les mers et les océans.

L'eau peut exister sous diverses formes : solide, liquide et gazeuse. Lorsque la température de l'air est inférieure à 0 °C, l'eau gèle, passe à l'état solide et devient de la glace. L'eau coule du robinet sous forme liquide, tandis que le jet de vapeur qui sort de la bouilloire est de l'eau sous forme gazeuse. D'ailleurs, l'eau présente dans les nuages que nous voyons dans le ciel revêt très souvent trois formes à la fois, c'est ce qui détermine les différentes formes que peuvent prendre les nuages.

Figure 2.4.1 Nuages noctulescents en Suède

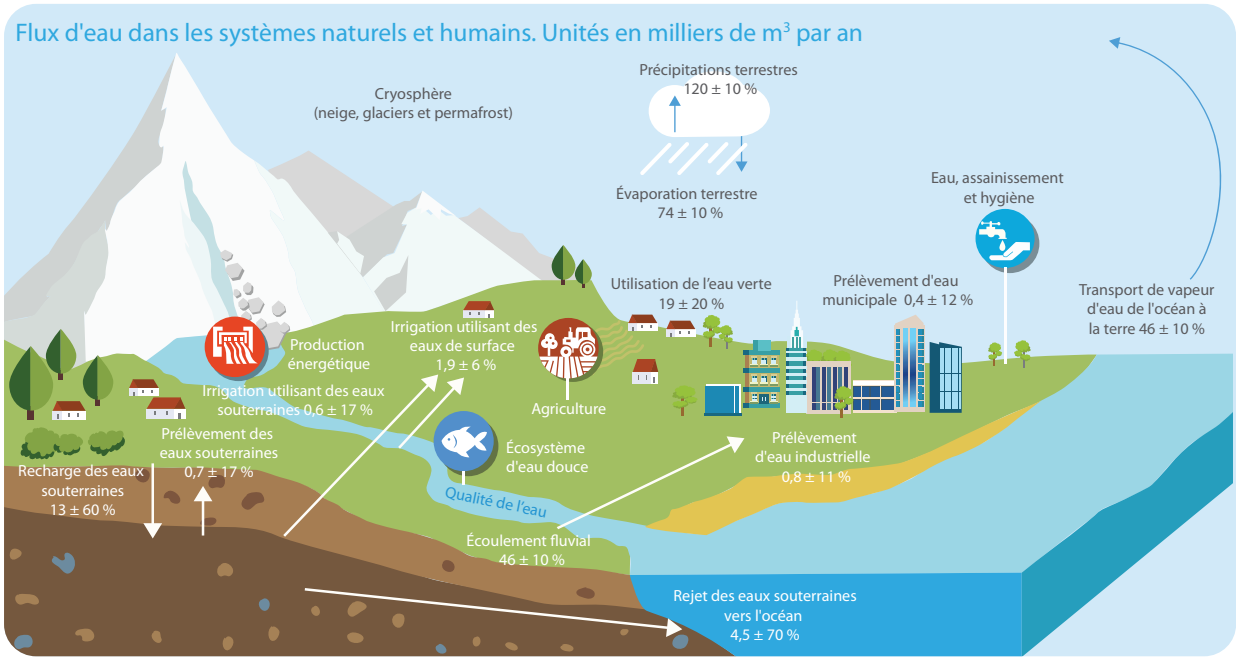
Les **nuages noctulescents** sont un type de formation atmosphérique particulièrement beau. Ils se trouvent à une altitude de 76 à 85 km au-dessus de la terre et ne sont formés que de cristaux de glace, ce qui détermine leur apparence fantastique. Les nuages noctulescents ne peuvent être observés que la nuit aux latitudes polaires, lorsqu'ils sont éclairés par le soleil, qui a déjà disparu derrière l'horizon.

La science qui permet d'étudier l'eau s'appelle **l'hydrologie**. On estime que les premières études hydrologiques ont été menées il y a 5 000 ans par les anciens Égyptiens sur le Nil : ils mesuraient la hauteur des inondations saisonnières en faisant des marques sur les murs des bâtiments, les rochers ou les marches situés le long du fleuve.

Sans eau sur notre planète, il n'y aurait pas de vie : nombres de plantes et d'animaux sont composés en grande partie d'eau. À titre d'exemple, le corps humain contient en moyenne 60 % d'eau. Cette proportion dépend de l'âge : le corps d'un nouveau-né contient 86 % d'eau, mais celui d'une personne âgée n'en contient que 50 %. Il est extrêmement important de boire suffisamment d'eau. Une personne peut vivre sans nourriture pendant environ un mois, mais ne peut survivre que 3 à 10 jours sans eau.

L'eau sur Terre prend de nombreuses formes qui sont en mouvement constant et qui constituent le cycle de l'eau. Le cycle de l'eau (Fig. 2.4.2) est le processus par lequel l'eau circule entre les océans, l'atmosphère et les terres de la Terre, comprenant les précipitations sous forme de pluie et de neige, le drainage dans les ruisseaux et les rivières et le retour dans l'atmosphère par évaporation et transpiration. Le cycle de l'eau est affecté par des facteurs à la fois climatiques et non climatiques.

Figure 2.4.2 **Le cycle de l'eau, comprenant les interventions humaines directes**



Toutes les parties du cycle de l'eau sur Terre qui sont utilisées ou pourraient être utilisées par les êtres humains sont appelées « ressources en eau ». Elles comprennent toute l'eau des rivières, des lacs, des canaux, des réservoirs, des mers et des océans, les eaux souterraines, l'humidité du sol, l'eau gelée (glace) des glaciers de montagne et des calottes glaciaires polaires, et même la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

Plus de 97 % de l'ensemble de l'eau de la planète se trouve dans les océans et les mers. L'eau de l'océan est salée et n'est pas potable. L'eau douce des rivières, des lacs, des cours d'eau et autres étendues d'eau de surface représente moins de 1 % du volume total d'eau de la planète. Cela peut sembler peu, mais il existe une autre vaste réserve d'eau douce : les glaciers et les calottes glacières de l'Antarctique et du Groenland. Ils représentent 2 % du volume total d'eau de la Terre, soit près de 8 fois plus que le volume total d'eau des lacs et des rivières combinés.

La protection des réserves d'eau douce de la planète est l'un des principaux problèmes environnementaux auxquels nous sommes confrontés à ce jour : sans ces réserves, l'homme ne peut survivre !

Le changement climatique et la demande croissante de nourriture et d'assainissement de la part d'une population mondiale croissante ont créé des pénuries d'eau dans de nombreux pays. Depuis le début du XX^{e} siècle, la population mondiale est passée de 1,6 à plus de 8 milliards de personnes. Dans la plupart des pays, l'utilisation d'eau a augmenté au cours des dernières décennies en raison de la croissance démographique rapide, des changements de modes de vie et du développement de la production agricole. Environ 70 % du volume total d'eau douce utilisée par l'homme est destiné à l'arrosage des champs de culture. Les experts de l'ONU estiment que d'ici 2050, près de 90 % des ressources mondiales en eau douce seront nécessaires à la production alimentaire.

Les experts de l'ONU ont également signalé la répartition inégale de l'eau potable à travers les continents : l'Asie héberge 60 % de la population mondiale, mais ne dispose que d'un tiers des ressources mondiales en eau. Selon l'Organisation mondiale de la Santé, en 2020, environ une personne sur quatre ne disposait pas d'eau potable gérée en toute sécurité dans son foyer et près de la moitié de la population mondiale ne disposait pas d'installations sanitaires gérées en toute sécurité, la plupart en Afrique.

L'objectif 6 des objectifs de développement durable des Nations Unies adoptés en septembre 2015 porte sur l'eau potable et l'assainissement, l'un de ses objectifs visant à parvenir à « un accès universel et équitable à une eau potable salubre et abordable pour tous » d'ici 2030.

Quels sont les effets du changement climatique sur les ressources en eau ?

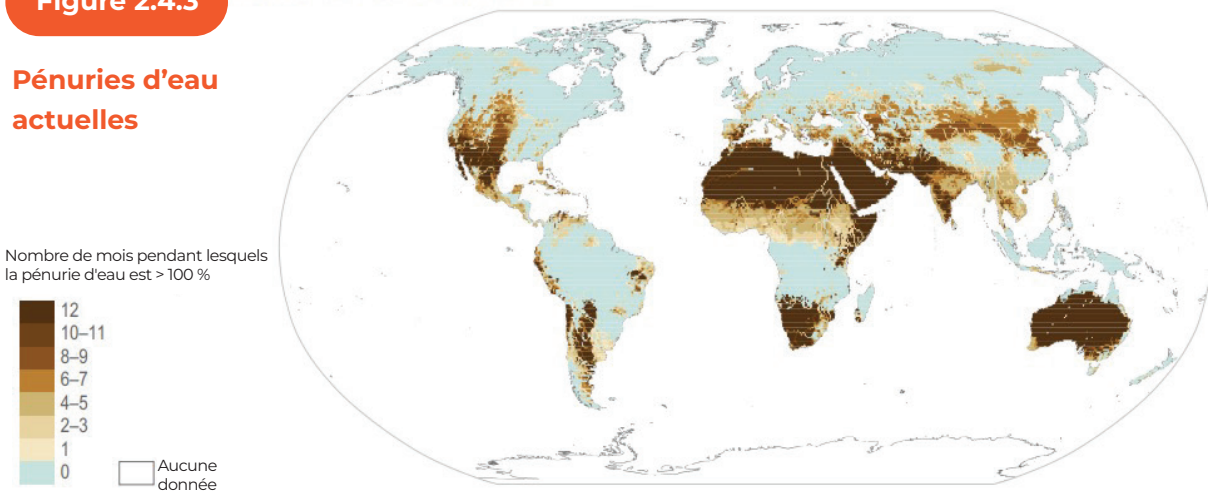
Toutes les sources d'eau douce de la Terre (rivières, lacs, marais, neige, glaciers, eau souterraine) sont étroitement liées au climat. Dans une certaine mesure, elles sont toutes le produit du climat, même si, bien sûr, elles dépendent toutes de différents composants du milieu naturel.

Nous savons déjà que le réchauffement climatique entraînera probablement, dans de nombreuses parties du monde, une augmentation de la fréquence des fortes précipitations, ce qui causera de graves inondations. Dans d'autres régions, au contraire, les précipitations devraient diminuer, laissant la place à des sécheresses plus fréquentes. Malheureusement, les régions bénéficiant d'un climat déjà trop humide gagneront encore davantage en humidité, et les régions sèches, notamment les régions situées au centre des continents, subiront davantage les effets de la sécheresse.

Les scientifiques notent que le changement climatique affectera considérablement les ressources en eau, entraînant des pénuries d'eau dans les régions arides du monde, notamment les pays méditerranéens, l'ouest des États-Unis, l'Afrique australe et le nord-est du Brésil. Ils définissent l'inadéquation entre la demande d'eau douce et sa disponibilité comme une pénurie d'eau. On estime qu'environ la moitié de la population mondiale, soit quatre milliards de personnes, vit dans des conditions de grave pénurie d'eau au moins un mois par an (Fig. 2.4.3). Près de la moitié d'entre eux vivent en Inde et en Chine. Même si les régions où l'eau est très rare sont déjà naturellement sèches, l'influence humaine sur le climat réduit la disponibilité de l'eau dans ces régions et dans de nombreuses autres régions. Avec un réchauffement de 2 °C, à l'échelle mondiale, 800 millions à trois milliards de personnes devraient connaître une pénurie chronique d'eau en raison de la sécheresse, et jusqu'à environ quatre milliards avec un réchauffement de 4 °C, si l'on considère les seuls effets du changement climatique, avec la population actuelle.

Figure 2.4.3

Pénuries d'eau actuelles

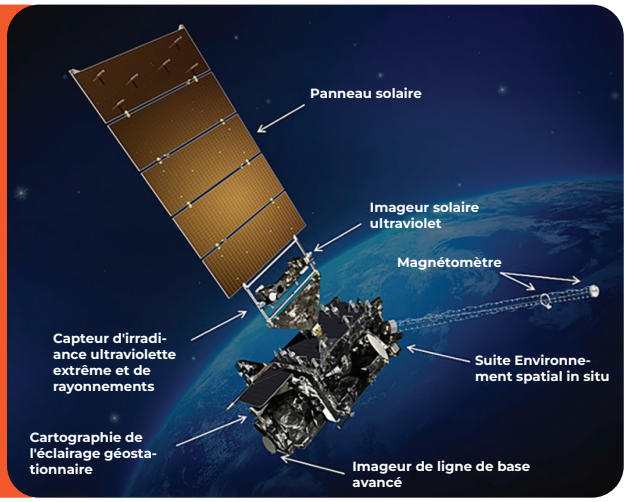


Modification de la disponibilité des ressources en eau d'ici 2050 comparé à la moyenne enregistrée entre 1961 et 1990.

Le changement climatique aura également une incidence significative sur les glaciers et la couverture neigeuse. Les satellites météorologiques indiquent que la superficie des terres enneigées de l'hémisphère Nord a considérablement diminué au cours de ces 45 dernières années. La diminution la plus manifeste du manteau neigeux des régions montagneuses a été observée dans l'ouest de l'Amérique du Nord et dans les Alpes suisses, notamment à basse altitude

Figure 2.4.4 **Satellite météorologique des États-Unis du service météorologique par satellite**

Les satellites météorologiques artificiels sont envoyés en orbite autour de la Terre afin d'obtenir des données météorologiques, lesquelles peuvent être utilisées pour les prévisions météorologiques et l'observation du climat. Pour ce qui est des autres satellites, ceux-ci peuvent transmettre des signaux TV, faire fonctionner des systèmes de navigation pour véhicules, et bien plus.



La modification de la quantité et du cycle de précipitations, la fonte des glaciers de montagne et la hausse générale des températures sur la planète, tout cela entraîne une modification du volume d'eau des rivières. En règle générale, le débit fluvial varie selon les saisons, mais certaines tendances s'inscrivent sur le long terme qui sont touchés actuellement par le changement climatique. Il pourrait en résulter des inondations importantes qui inonderont les villages situés le long des cours d'eau ou, inversement, un assèchement du lit des rivières. Sous les latitudes tempérées, les rivières gèlent plus tard et dégèlent plus tôt. Ces changements sont à prendre en considération dans la planification économique, les rivières jouant un rôle important dans l'économie de nombreux pays. Elles constituent des voies de transport de marchandises et de passagers, sont sources d'énergie hydroélectrique et constituent des réservoirs d'eau douce pour la consommation humaine et pour l'irrigation

UN BASSIN DE DRAINAGE
est une zone où toutes les eaux souterraines et de surface s'écoulent vers un plan d'eau donné, y compris ses affluents.

Figure 2.4.5 Le fleuve Amazone, en Amérique du Sud, possède la plus grande aire de drainage du monde, d'une superficie de 7 millions de km²

Figure 2.4.6 Le Nil est le plus long fleuve du monde

Les pays qui disposent des plus importantes réserves d'eau douce au monde sont le Brésil (le plus grand fleuve du monde, l'Amazone, traverse son territoire), suivi de la Russie et du Canada. Cependant, la répartition des réserves d'eau douce dans le monde est extrêmement inégale. Environ 700 millions de personnes dans 43 pays sont, de nos jours, victimes de pénuries d'eau. Même dans les pays comme le Brésil ou la Russie, certaines régions ont déjà été confrontées à des pénuries (Fig. 2.4.9). Cette injustice de la nature ne fera que croître avec le temps en raison du changement climatique : les régions souffrant déjà de pénuries d'eau deviendront encore plus arides (Fig. 2.4.3 et 2.4.8).

Figure 2.4.7

Le lac Baïkal est la plus grande réserve d'eau douce sur Terre

Figure 2.4.8 Baisse prévue de l'approvisionnement en eau dans différents comptés des USA : (a) sans les effets du changement climatique, et (b) avec les effets projetés du changement climatique

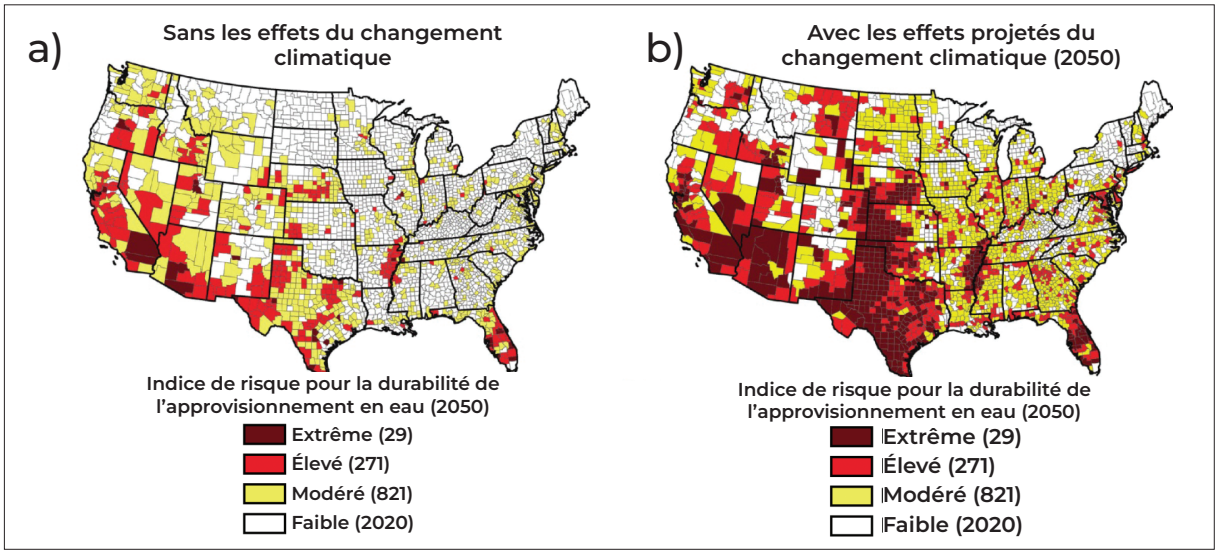


Figure 2.4.9 Les pénuries d'eau sont déjà un problème dans le sud de la Russie

Comment réduire les risques et faciliter l'adaptation ?

Jusqu'à récemment, les personnes en charge de la gestion des ressources en eau n'avaient pas conscience que le changement climatique les contraindrait à revoir l'intégralité du système de gestion des ressources en eau. Faute de mesures appropriées en temps opportun, les dommages causés par les soudaines et graves sécheresses, inondations ou réductions des ressources en eau pourraient être considérables. Les scientifiques notent que l'adaptation aux risques et impacts liés à l'eau constitue une grande partie de toutes les adaptations documentées dans le monde et proposent une série de mesures.

Premièrement, l'amélioration des prévisions météorologiques est nécessaire. Cela permettra de prévoir à l'avance les éventuels phénomènes météorologiques graves.

Deuxièmement, de nombreuses solutions technologiques et techniques peuvent contribuer à réduire les risques pour les personnes et les infrastructures, de la construction de nouveaux barrages et réservoirs le long des rivières pour réguler leur débit, à la création de structures le long des berges pour protéger les communautés voisines des inondations.

Troisièmement, nous devrons réduire notre consommation d'eau. Nous pouvons y parvenir, par exemple, en utilisant l'eau de pluie ou en utilisant deux fois la même eau pour différents besoins. Les installations spéciales visant à transformer l'eau salée en eau douce par dessalement semblent également prometteuses (Fig. 2.4.10). Mais avant toute chose, nous devons nous rappeler d'utiliser l'eau de manière efficace.

Figure 2.4.10 **Une usine de dessalement de l'eau de mer aux Émirats arabes unis**

Quatrièmement, nous pouvons appliquer plus largement des solutions fondées sur la nature pour nous adapter à la pénurie d'eau résultant du changement climatique. De telles solutions s'appuient sur des processus naturels pour améliorer la disponibilité et la qualité de l'eau, et réduire les risques associés aux catastrophes liées à l'eau tout en contribuant à la biodiversité. Per exemple en utilisant des systèmes naturels ou semi-naturels tels que les zones humides et les écosystèmes d'eau douce sains pour fournir de l'eau propre, réguler les inondations, améliorer la qualité de l'eau et contrôler l'érosion. Des villes comme New York et Copenhague ont intégré dans leur planification urbaine des plans d'investissement à grande échelle comprenant des solutions fondées sur la nature pour faire face aux événements de précipitations extrêmes à fort impact. Il s'agit d'une tendance croissante : selon la base de données du Carbon Disclosure Project, une ville sur trois utilise des solutions fondées sur la nature pour faire face aux risques climatiques liés à l'eau.

S'inspirer des connaissances locales et autochtones : comment les anciens Indiens d'Amérique Latine se sont adaptés au changement climatique

Les peuples indigènes d'Amérique centrale et du Sud vivaient principalement des cultures qu'ils faisaient pousser autour de leurs villages. Dans les régions des hauts plateaux, où étaient concentrées de nombreuses anciennes civilisations indiennes, la production de nourriture était limitée en raison de la répartition inégale des ressources en eau. Il n'y avait pas de pénurie d'eau durant la saison des pluies, mais comment ces anciens peuples faisaient-ils durant la saison sèche ?

La principale source d'eau durant la saison sèche était les rivières coulant des glaciers des montagnes, mais elles n'approvisionnaient que les villages situés dans les vallées fluviales. Les anciennes tribus indiennes ont inventé toute une série de technologies et de dispositifs pour assurer un approvisionnement en eau provenant des montagnes tout au long de l'année.

Les indiens ont appris à retenir, filtrer et stocker l'eau, à construire des canaux d'irrigation souterrains et de surface, et ont inventé des dispositifs pour mesurer la quantité d'eau dont ils disposaient en réserve. Ils ont même relié les bassins fluviaux des océans Pacifique et Atlantique. Ils ont également développé un système de prévisions météorologiques capable de prédire le début de la saison des pluies et de la saison sèche, afin de pouvoir mieux organiser l'ensemencement et la récole des cultures.

Les peuples indigènes d'Amérique ont utilisé leurs compétences en ingénierie pour redresser les lits des rivières et construire des ponts, des ponts suspendus et des ponts sur supports implantés dans le lit de la rivière. Ils ont construit des conduites d'eau courante pour leur usage quotidien et pour les cérémonies religieuses. Les prêtres de la culture Chavin ont, à l'aide de conduites, acheminé l'eau
à l'intérieur de leurs temples pour obtenir un son semblable au rugissement d'un jaguar, un animal qu'ils vénéraient comme dieu.

A l'aide d'une technique ingénieuse, ils utilisaient l'eau pour couper des blocs de pierre utilisés aux fins de construction. L'eau était acheminée au moyen de conduites spécialement conçues à cet effet à l'intérieur de la pierre, puis était exposée la nuit aux températures négatives afin de geler, ce qui créait progressivement des fissures qui divisaient la pierre en formes régulières, nécessaires pour la construction.

Les Indiens d'Amérique centrale et du Sud, habitants d'un vaste territoire s'étendant du Mexique moderne, au nord, au Chili et à l'Argentine, au sud, ont donc été des pionniers de l'utilisation des diverses technologies pouvant être utilisées pour s'adapter aux conditions climatiques défavorables.

Figure 2.4.11

Système de collecte de l'eau dans la région Nazca (côte sud-est du Pérou) pour les aqueducs souterrains et la distribution de l'eau souterraine

QUESTIONS

1. Comment s'appelle la science permettant d'étudier l'eau ?

2. Quel est le pays qui dispose de la plus grande réserve d'eau douce au monde ?

3. Quelles sont les régions du monde particulièrement touchées par les pénuries d'eau et pourquoi ?

4. Quel est le nom du bassin fluvial où se trouve votre ville de résidence et dans quelle mer se déverse-t-il ?

5. Énumérez au moins trois mesures d'adaptation qui contribuent à réduire les risques liés au changement climatique sur les ressources en eau.

EXERCICE

Trouvez le fleuve Amazone sur une carte physique du monde. Mesurez sa longueur et la superficie de son bassin de drainage et comparez-les avec la plus importante rivière de votre pays.

2.5 Les effets du changement climatique sur **l'agriculture**

D'aucun pourrait penser que le changement climatique serait favorable à l'agriculture dans les pays du nord. Mais un climat plus chaud n'est pas nécessairement meilleur. S'il se réchauffe dans les régions où il faisait auparavant trop froid pour cultiver du blé, il se réchauffera également dans les régions bénéficiant déjà d'un climat idéal pour l'agriculture, et une température plus élevée entraînera un taux d'humidité moindre et une productivité réduite. Il deviendra donc plus difficile (voire impossible) de cultiver les terres dans des régions où elles l'ont été pendant des siècles et où des traditions agricoles particulières ont pris forme.

Les conditions de production agricoles seront donc meilleures à certains endroits, mais pires à d'autres, et il est extrêmement difficile pour l'heure de prédire le résultat final d'un tel « bouleversement mondial » pour plusieurs pays.

Il est important de rappeler que le climat n'est pas le seul facteur naturel ayant une incidence sur l'agriculture.

Par exemple, l'une des principales cultures céréalières en Amérique du Nord, en Europe et en Sibérie est le blé d'hiver. Le réchauffement climatique signifie que la zone bénéficiant des conditions climatiques propices à sa culture sera amenée à se déplacer vers le nord. Mais le sol de ces nouvelles régions n'est pas aussi adapté que celui des régions où le blé d'hiver est actuellement cultivé. L'amélioration de la qualité du sol dans les régions plus au nord nécessitera beaucoup de travail et coûtera très cher.

Le **blé d'hiver** est semé non pas au printemps, comme les autres variétés de blé, mais à la fin de l'été et au début de l'automne, afin que les semences aient le temps de germer et de prendre racine avant l'arrivée de la neige hivernale. Le blé reprend ensuite sa croissance lorsque la chaleur du printemps fait son apparition et mûri un peu plus tôt que les cultures qui n'ont été semé qu'au printemps

Le changement climatique affecte la production de fruits et de légumes. Les fruits à noyaux, notamment les cerises, ont besoin d'heures fraîches pour porter des fruits. Si les nuits fraîches sont trop peu nombreuses, les arbres auront moins de chance de mener à bien leur pollinisation et produiront moins de fruits. Une vague de froid exceptionnelle peut être toute aussi désastreuse. En 2023, le « Peach State » de Géorgie, aux États-Unis, a perdu plus de 90 % de sa récolte annuelle de pêches à cause d'un hiver anormalement chaud, suivi d'un gel en fin de saison.

Les pays bénéficiant de climats tempérés et plus rigoureux, comme le Canada et la Russie, pourraient être confrontés à un autre type de problème, à savoir une concurrence accrue entre la sylviculture et l'agriculture. Le changement climatique permettra de transformer les terres actuellement occupées par des forêts en terrains agricoles, ce qui pourrait accélérer la déforestation. Même dans les régions où les conditions propices à l'agriculture sont tout juste acceptables (à l'extrême nord de la zone agricole), la productivité d'un hectare de terres consacrées aux cultures reste supérieure à celle d'un hectare de terrain forestier. Une profonde réflexion devra donc être menée avant que de nouveaux territoires ne décident de se tourner vers l'agriculture.

Partout dans le monde, l'agriculture devra s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Les experts de l'Organisation internationale pour l'alimentation et l'agriculture estiment que les rendements des cultures, dans de nombreuses régions du monde, connaîtront un déclin après 2030 en raison du changement climatique. Selon les prévisions, les conséquences les plus graves se feront ressentir dans les régions tropicales, où une nouvelle baisse des précipitations pourrait être enregistrée.

Des sécheresses, inondations et fluctuations pluviométriques de plus en plus fréquentes dans Afrique subsaharienne compliqueront considérablement l'alimentation des populations locales pendant les décennies à venir. Les experts de la Banque mondiale ont calculé qu'une diminution des précipitations associée à une hausse des températures moyennes mondiales de 1,5 à 2 °C, réduira de 40 à 80 % la superficie des terres propices aux cultures de maïs, de millet et de sorgho en Afrique subsaharienne d'ici 2030 à 2040.

Au Mexique, la sécheresse réduit actuellement la superficie des terres propices à la culture du maïs, laquelle est la principale culture agricole du pays.

Les céréales sont un groupe de plantes extrêmement important, produisant des graines, qui constituent l'alimentation de base des populations, ainsi que les matières premières nécessaires pour de nombreuses industries et l'alimentation des animaux d'élevage. Les principales cultures de céréales sont le blé, le seigle, le riz, l'avoine, l'orge, le maïs, le sorgho, le millet, le sarrasin, entre autres.

La principale culture de céréales en Asie du Sud-Est est le riz, lequel est majoritairement cultivé dans les deltas des vastes fleuves. À mesure que le niveau des océans augmente, en raison des effets du changement climatique, les sections basses des rivières se remplissent d'eau salée, ce qui pourrait entraîner une perte des récoltes. Certaines parties du Delta du Mékong au Vietnam, l'un des plus importants centres de culture du riz au monde, sont particulièrement touchées par la montée du niveau des océans. Une simple montée de 30 cm du niveau des océans peut entraîner une réduction des cultures de riz de 11 %.

L'agriculture est donc menacée par les effets du changement climatique comme la hausse des températures, la modification des régimes pluviométriques, la montée du niveau des océans (qui affecte les basses terres littorales) et les sécheresses et inondations fréquentes, notamment dans les régions sujettes aux catastrophes naturelles. À la suite de ces changements qui ont une incidence majeure sur l'agriculture, la sécurité alimentaire devient un problème de plus en plus sérieux.

Le concept de sécurité alimentaire prévoit que tous les êtres humains aient, à tout moment, la possibilité de se procurer une nourriture suffisante, saine, nutritive et savoureuse afin de mener une vie active et saine.

La FAO a estimé que 2,3 milliards de personnes, soit 28 % de la population mondiale, étaient confrontées à l'insécurité alimentaire en 2021, exacerbée par les effets de la pandémie de COVID-19. L'Inde, le Pakistan et la Corne de l'Afrique ont été particulièrement touchés en raison des pertes dues aux phénomènes météorologiques extrêmes. La chaleur extrême enextrême en Inde et au Pakistan a entraîné une baisse des rendements agricoles qui, combinée à l'interdiction des exportations de blé et aux restrictions imposées sur les exportations de riz par l'Inde, a constitué une menace pour les marchés alimentaires internationaux et les pays déjà touchés par des pénuries alimentaires. Les pluies de mousson ont provoqué des inondations sans précédent au Pakistan, avec une augmentation des maladies d'origine hydrique, qui se propagent dans les régions les plus vulnérables et les plus exposées à l'insécurité alimentaire. En Éthiopie, au Kenya et en Somalie, on estime que 22,5 à 23,4 millions de personnes sont confrontées à une crise alimentaire ou à l'insécurité alimentaire en raison de la sécheresse et d'autres facteurs. Des réductions importantes de l'aide alimentaire ont touché 75 % de la population totale de réfugiés.

L'agriculture est la principale source de revenu d'un tiers de la population active mondiale. Dans certains pays d'Asie et d'Afrique, plus de la moitié de la population exerce des activités agricoles. Le changement climatique non seulement réduit le volume de production alimentaire, mais a également des répercussions sur les revenus tirés de l'agriculture. Et si la chaleur et la sécheresse impliquent que les aliments, en quantité limitée, sont préparés dans des plats sales, par des personnes ayant les mains sales, et ne peuvent être convenablement conservés, alors ces aliments représenteront un danger pour la santé humaine.

Par conséquent, même les pays du nord ne peuvent espérer que le changement climatique leur sera profitable pour l'agriculture, sans souffrir d'aucun inconvénient ; et les populations vivant dans des régions tempérées ou plus fraîches pourront difficilement s'attendre à cultiver des oranges dans leur jardin dans un proche avenir. Les stratégies d'adaptation intelligentes face au climat qui soutiendront l'agriculture et les personnes qui y travaillent sont devenues une priorité urgente.

Quels sont les meilleurs moyens d'adaptation en agriculture ? La plupart des approches d'adaptation en agriculture reposent sur une utilisation efficace des ressources en eau et se concentrent principalement sur l'augmentation de l'efficacité des systèmes d'irrigation. Cela comprend l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte, l'expansion des zones irriguées, la collecte et l'utilisation de l'eau de pluie pour l'irrigation, l'ajustement des horaires d'irrigation et le passage d'une agriculture pluviale à une agriculture irriguée.

D'autres options d'adaptation liées aux ressources en eau comprennent la restauration des bassins versants des rivières et des programmes de gestion intégrée de l'eau. Les options spécifiques à l'agriculture comprennent la promotion d'une agriculture et d'une agroforesterie durables, la diversification des plantes et du bétail, la modification des modèles et des systèmes de culture en plantant des plantes résistantes à la chaleur et à la sécheresse, et des changements dans les pratiques agricoles, telles que la plantation d'arbres le long des champs pour servir de protection contre le vent, l'installation de filets anti-grêle et construction de serres supplémentaires.

Les scientifiques nous préviennent que l'irrigation des cultures, l'ajustement des périodes de plantation et la modification des modèles et des systèmes de culture pourraient atteindre de plus en plus les limites d'adaptation à mesure que le réchauffement climatique dépasse 1,5 °C et 2 °C. Cela s'applique particulièrement à l'Afrique, où l'adaptation devient beaucoup moins efficace avec une augmentation de 1,5 °C.

Figure 2.5.1 **Les systèmes d'irrigation intelligents, un pas en avant pour la conservation de l'eau et l'adaptation au changement climatique**

QUESTIONS

1. Quelle est la différence entre le blé de printemps et le blé d'hiver ? Lequel serait-il le plus adapté à votre région et pourquoi ?

2. Quelles sont les céréales cultivées dans votre région ? Sont-elles menacées par le changement climatique ?

3. Pourquoi la montée du niveau des océans constitue-t-elle une menace pour la production du riz en Asie du Sud-Est ?

4. Qu'est-ce que la sécurité alimentaire ? Expliquez-la à l'aide d'un exemple.

5. Quel est le pourcentage de personnes exerçant des activités agricoles dans le monde ?

6. Quels types de mesures d'adaptation – mentionnées dans ce chapitre et dans d'autres – sont recommandées pour faire face aux impacts climatiques sur l'agriculture ? Quel est le lien entre ces mesures et les ressources en eau ?

EXERCICE

Avec l'aide de votre professeur de géographie, faites une liste des principales cultures cultivées dans votre région.

Trouvez des informations sur le rendement de ces cultures dans votre région au cours de ces dernières années. Est-il en hausse ou en baisse ? Y a-t-il eu de mauvaises récoltes durant cette période et pour quelle raison ?

Réfléchissez à la manière dont le changement climatique pourrait affecter le rendement de ces cultures et des autres cultures dans votre région. Les nouvelles conditions climatiques pourraient-elles permettre le développement d'autres cultures ?

2.6 Les effets du changement climatique sur **les régions côtières**

Plus de 40 % de la population mondiale vit à moins de 100 kilomètres de la côte. La plupart des plus grandes villes, ports et zones touristiques du monde sont situés sur ou à proximité des côtes, où est concentrée plus de 70 % de la production mondiale totale.

Les régions côtières sont étroitement liées aux régions situées dans les terres. Par conséquent, tout impact sur les régions côtières a des répercussions sur l'économie et les conditions de vie, y compris pour les régions plus en retrait. Les zones côtières sont très vulnérables aux effets du changement climatique. Les principales menaces qui pèsent sur elles proviennent de l'élévation du niveau de la mer, des tempêtes plus intenses qui provoquent des inondations et de l'érosion des côtes, ainsi que de phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents.

La montée du niveau des océans du monde

Le niveau des océans du monde monte progressivement depuis plus de 100 ans. Il s'est élevé de 15 à 25 cm, une moyenne de 1-2 mm par an, entre 1901 et 2018. Cela peut sembler peu, mais cela constitue un réel danger pour les pays où le niveau de la terre n'est pas beaucoup plus élevé que celui de la mer (ou est même inférieur).

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat estime que la montée du niveau des océans du monde depuis le milieu du 19e siècle s'est accélérée par rapport à la moyenne enregistrée au cours des 2 000 années précédentes. Depuis 1901, le niveau de la mer augmente à un rythme accéléré. Le taux moyen d'élévation du niveau de la mer était de 15 à 25 cm, soit 1 à 2 mm par an entre 1901 et 2018, passant à 4,62 mm par an pour la décennie 2013-2022.

Le changement climatique d'origine humaine est principalement à l'origine de l'élévation du niveau de la mer et est principalement dû à :

1. La dilatation thermiques de l'eau. À mesure que les températures augmentent, l'eau se dilate et occupe plus d'espace.

2. La fonte des glaciers au Groenland et en Antarctique, qui rajoute de l'eau dans les océans du monde.

Pour prévoir le changement climatique, les scientifiques utilisent des modèles mathématiques complexes, qui tiennent compte de la diversité des facteurs responsables du changement climatique. Bien sûr, ces modèles ne peuvent prédire avec précision de combien de centimètres le niveau des océans montera au cours des 30, 50 ou 100 prochaines années Bien qu'ils appliquent des scénarios selon lesquels, par rapport à la période 1995-2014, le niveau de l'océan mondial augmentera entre 15 et 29 cm d'ici 2050 et entre 28 cm et 1,01 m d'ici 2100. Au cours des 2000 prochaines années, le niveau de l'océan mondial augmentera d'environ deux à trois mètres si le réchauffement est limité à 1,5 °C et de deux à six mètres si le réchauffement est limité à 2 °C.

La montée prévue du niveau des océans d'ici la fin de ce siècle sera en moyenne comprise entre 40 et 63 cm, ce qui constitue une grave menace pour les régions côtières, et particulièrement les petites îles coralliennes ainsi que la côte Pacifique basse de l'Asie du Sud-Est. La montée du niveau des océans sera inégale, et devrait être beaucoup plus marquée sous les tropiques, où le XXII^{e} siècle pourrait être le témoin d'élévations de 1 à 3 m, suivies au cours du siècle suivant d'une montée de 5 à 10 m par rapport aux niveaux actuels.

La forte croissance démographique et l'urbanisation dans les zones côtières de basse altitude seront les principaux facteurs de risque résultant de l'élévation du niveau de la mer dans les décennies à venir. D'ici 2030, 108 à 116 millions de personnes seront exposées à l'élévation du niveau de la mer en Afrique (contre 54 millions en 2000), et ce chiffre passera à 190 à 245 millions d'ici 2060 (degré de confiance moyen). D'ici 2050, plus d'un milliard de personnes vivant dans des villes et des agglomérations de basse altitude seront menacées par des aléas climatiques spécifiques aux côtes

Les Pays-Bas se préparent à un choc climatique

Les Pays-Bas sont un pays très bas. Une grande partie des terres de ce pays de petite taille, mais fortement industrialisé, ont été obtenues grâce au drainage des régions côtières.

Les Hollandais ont développé depuis des siècles des techniques d'élimination de l'eau des plaines marécageuses. Les ingénieurs hollandais, novateurs, ont depuis longtemps prévu la menace que représente la montée du niveau de la mer, et ont amélioré la conception des structures hydrauliques, qui sont capables de freiner l'avancée de la mer.

Figure 2.6.1

Des moulins à vent ont été utilisées pour pomper l'eau des lacs

Figure 2.6.2

Afsluitdijk, en Hollande, est le plus grand barrage d'Europe

Les régions côtières seront-elles englouties par les océans ?

Du fait de la montée du niveau des océans, les plaines côtières seront inondées, le littoral sera progressivement englouti par la mer, et les réserves d'eau douce proches des régions côtières pourraient disparaître. Ces menaces sont particulièrement graves pour les régions côtières densément peuplées comme le Bangladesh, le Nigeria et l'Indonésie. Plusieurs grandes villes sont également menacées par la montée du niveau des océans, notamment Shanghai, Bangkok, Mumbai, Jakarta, Buenos Aires, Rio de Janeiro, Miami et la Nouvelle-Orléans.

Une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 1 m engloutira jusqu'à 15 % des terres cultivables en Égypte, et 14 % des terres cultivables du Bangladesh, contraignant ainsi des millions de personnes à s'installer ailleurs. L'eau salée de la mer pourrait s'infiltrer dans les eaux côtières souterraines, lesquelles constituent la principale source d'eau douce dans de nombreuses régions du monde.

En Chine, les prévisions indiquent que même une légère élévation de l'ordre de 0,5 m entraînera l'inondation d'environ 40 000 km² de plaines fertiles en Chine. Les basses plaines et les cours inférieurs des grands fleuves (le fleuve Jaune, le fleuve Yangtze, etc.) seront particulièrement vulnérables. La densité moyenne de population le long de ces fleuves s'élève parfois à 800 habitants par km².

Dans un bon nombre de petits États insulaires, les terres émergées ne s'élèvent qu'à quelques dizaines de centimètres au-dessus du niveau de la mer. Ces îles pourraient être complètement submergées par la montée des océans, et leurs habitants seront alors contraints de chercher refuge dans d'autres pays.

Figure 2.6.3 **Prévisions d'inondations côtières sur différents continents, en supposant une montée de 5 m du niveau des océans**

Avis de tempête

Les tempêtes sont récemment devenues plus fréquentes au niveau des régions côtières et en mer. Des vents violents, que ce soit près des côtes ou en mer, provoqueront des « ondes de tempête », c'est-à-dire une montée soudaine du niveau des étendues d'eau semi-ouvertes sur la mer (baies, cours inférieurs des fleuves). Les ondes de tempêtes frappent les régions côtières et sont souvent accompagnées de fortes précipitations et d'inondations, ce qui menace le déplacement des navires, le travail sur les plateformes pétrolières et le tourisme balnéaire, et provoque également une érosion du littoral.

Figure 2.6.4 Les tempêtes sont devenues plus fréquentes en zones côtières

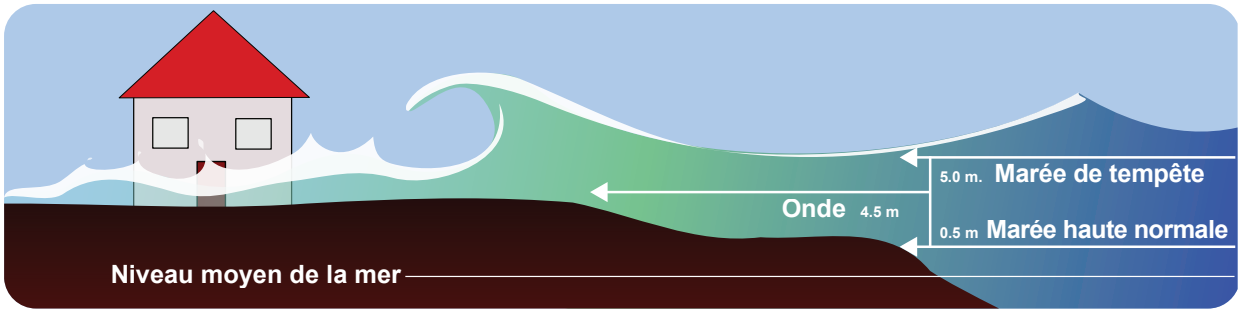
Tragédie aux Philippines

En novembre 2013, les Philippines ont été frappées par une catastrophe naturelle comparable, par son envergure, à la tragédie survenue au Japon deux ans plus tôt, lorsque celui-ci a été frappé par un tsunami occasionné par un séisme sous-marin dans l'océan Pacifique. Les Philippines sont un archipel montagneux souvent victime de typhons provenant de l'océan Pacifique : en pareil cas, les Philippines protègent efficacement le continent asiatique situé derrière elles. Le scénario, en 2013, a été le suivant.

Dans un premier temps, les Philippines ont été frappées par un super-typhon nommé « Haiyan » (connu sous le nom de « Yolanda » aux Philippines), qui a coûté la vie à 6 300 personnes ; puis il a été suivi d'une seconde tempête, appelée « Zoraida ». Les autorités philippines ont déclaré que près de 7 millions d'habitants du pays ont été touchés par la catastrophe (cette perturbation météorologique a complètement détruit 21 200 foyers et en a endommagé 20 000 autres).

Le plus important dommage en novembre 2013 a été occasionné par l'onde de tempête de 5 mètres de haut (soit la hauteur d'un deuxième étage) ayant frappé certaines régions ; aucun barrage ne permettait de protéger le littoral de ces régions.

Figure 2.6.5 Onde de tempête



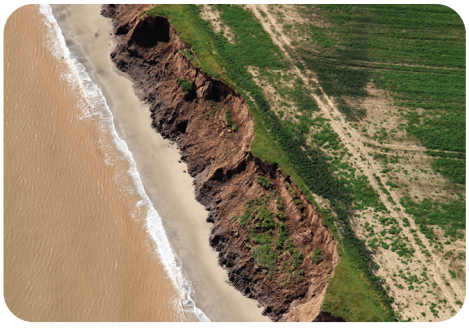
Érosion et destruction du littoral

L'érosion et la destruction du littoral par la mer est une autre conséquence de la montée du niveau des océans (Fig. 2.6.6 à 2.6.9). L'érosion touche particulièrement la côte arctique, qui était auparavant protégée par la glace, mais qui perd désormais rapidement du terrain, car la couverture glaciaire s'est amoindrie et les tempêtes sont plus fréquentes. La côte arctique recule d'au moins 10 à 25 m chaque année à certains endroits.

Figure 2.6.6 Destruction du littoral des Îles de Nouvelle-Sibérie en Arctique.

Bien sûr, l'érosion du littoral par les vagues et les inondations n'est pas un fait nouveau. En prenant une carte des archipels faite il y a plus de 100 ans, vous constaterez que nombre des îles qui y figurent n'existent plus (Fig. 2.6.8). Aujourd'hui, ce processus s'accélère. Les phares initialement construits à une distance sûre du bord de la falaise tombent désormais dans la mer (Fig. 2.6.9), de grandes zones de peuplement submergées contraignent les habitants à se réinstaller ailleurs, et les routes doivent être déviées.

Figure 2.6.7 Exemple de littoral marin érodé



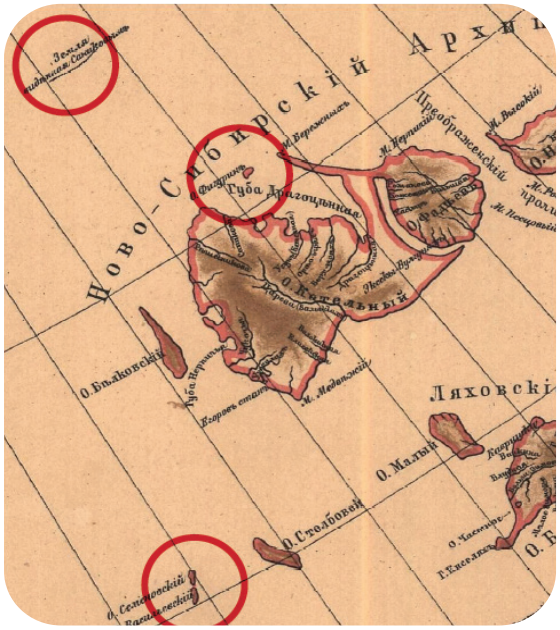


Figure 2.6.8

Érosion de la côte arctique. Sur cette partie de la carte, qui date de 1890 et montre la mer de Laptev et les Îles de Nouvelle-Sibérie, les cercles rouges indiquent des îles qui n'existent plus aujourd'hui (elles ont été englouties par des raz-de-marée)

Figure 2.6.9

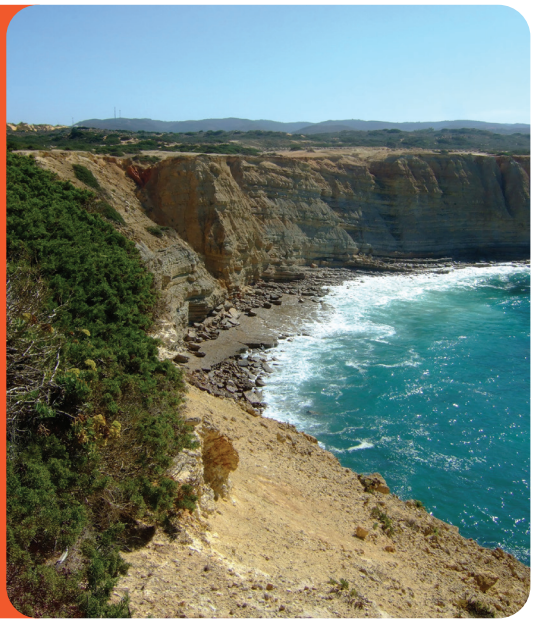
Le phare côtier de Vankin (mer de Sibérie orientale, île de Bolshoi-Lyakhovsky), qui n'existe plus

En Alaska, l'ensemble du village de Kivaluna, où vivaient 400 personnes sur une étroite bande de terre en bordure de l'océan Arctique, a dû être abandonné, et ses habitants transférés loin de la côte. L'opération a coûté plus de 200 millions de dollars américains, malgré la taille relativement petite du village (environ 70 logements).

Les plages disparaissent au Portugal

Les écologistes sont préoccupés par l'impact de l'érosion du littoral portugais, qui pourrait priver ce pays européen de nombre de ses plages dans un proche avenir

À certains endroits le long de la côte portugaise, la mer submerge chaque année plusieurs mètres de terres, et la situation est critique dans la région nord d'Espinho, où le rivage a régressé de 70 m au cours des dernières décennies. Ce processus est irréversible.



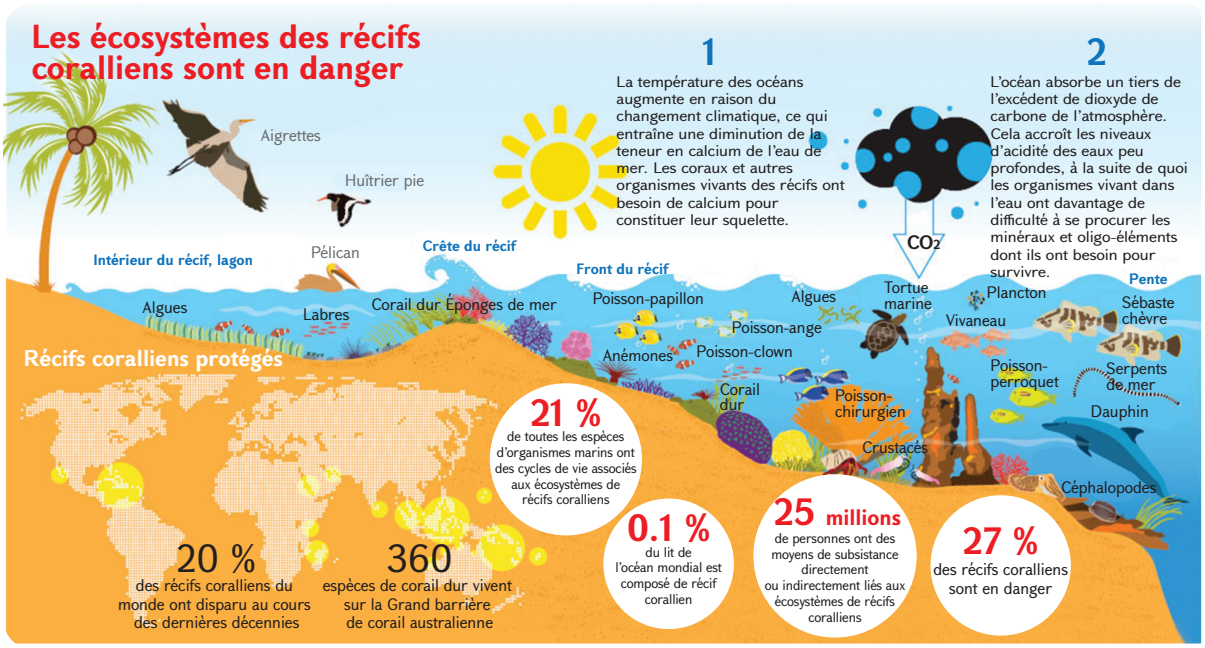
Risque pour les écosystèmes côtiers

Outre son impact sur les populations et l'économie, la montée du niveau de la mer affecte également les écosystèmes marins et terrestres situés le long des côtes.

Les écosystèmes des basses terres littorales sont particulièrement vulnérables, car ils ne se trouvent généralement qu'à quelques centimètres au-dessus du niveau de la mer. Ces basses terres abritent de nombreuses espèces d'animaux et de plantes, et jouent un rôle essentiel dans l'accumulation des nutriments. Ces écosystèmes comprennent des marais salants, qui sont inondés à marée haute. Les forêts de mangrove, que l'on trouve généralement dans les basses terres littorales bénéficiant d'un climat tropical humide, sont également menacées par la montée du niveau des océans.

Le réchauffement climatique constitue une menace importante pour les récifs coralliens, car l'augmentation de la température de l'eau au-delà d'un certain seuil entraînera le blanchiment du corail. Le blanchiment signifie que les coraux se sont délestés des algues symbiotiques qui y résident normalement et se sont décolorés suite à un stress. En cas de blanchiment important ou prolongé, ils peuvent mourir. Un tel blanchiment des coraux est déjà visible en de nombreux endroits

Figure 2.6.10 Écosystèmes de récifs coralliens en danger



Une augmentation à long terme de la température de l'eau de mer pourrait entraîner une dégradation majeure de l'ensemble de l'écosystème des récifs coralliens. Des atolls coralliens, qui offrent un habitat à un grand nombre d'organismes vivants, pourraient être détruits. Selon les prévisions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 18 % des récifs coralliens du monde seront détruits au cours des trois prochaines décennies, en conséquence de l'incidence d'une foule de facteurs.

Changement climatique et pêche

Les scientifiques et les pêcheurs sont préoccupés par l'augmentation de la température et de l'acidité de l'eau de mer. À mesure que les concentrations de CO_2 présent dans l'atmosphère augmentent, l'absorption de CO_2 par l'océan augmente également, ce qui accroît les niveaux d'acidité (pH). Les variations de pH et de température de l'eau n'ont, jusqu'à présent, pas été significatives, mais ont néanmoins été suffisantes pour provoquer le blanchiment de coraux. D'ici le milieu du siècle, l'acidité pourrait augmenter de 0,06 à 0,34 pH, ce qui est 100 fois plus rapide que le taux de variation enregistré au cours des 20 derniers millions d'années. De nombreux organismes marins éprouveront des difficultés à s'adapter aux nouvelles conditions, ce qui aura de sérieuses conséquences sur la diversité des espèces de poissons et la productivité marine.

Figure 2.6.11 **Prévisions de modification de l'acidité des eaux océaniques de surface d'ici la fin du XXIe siècle, selon le scénario de changement climatique le plus favorables (à gauche) et le moins favorable (à droite)**

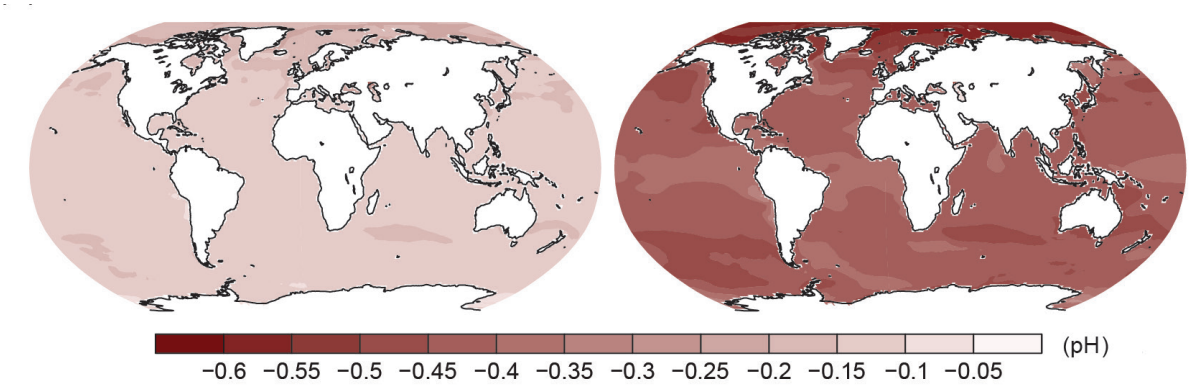
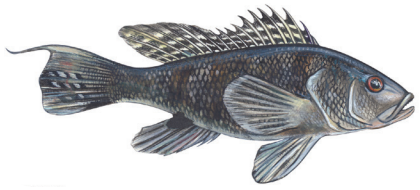
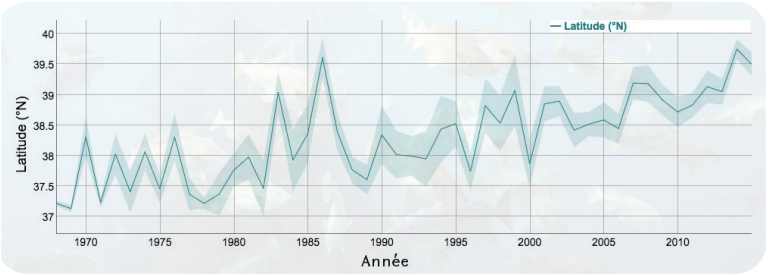


Figure 2.6.12 **Le bar noir migre vers le nord, car les océans se réchauffent**





La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis et l'université Rutgers ont développé **l'outil web OCEANADAPT** afin de suivre les déplacements des poissons et des invertébrés résultant de l'évolution des conditions climatiques et océaniques. Cet outil permet d'accéder facilement à diverses informations concernant les changements de profondeur et de latitude de près de 650 espèces marines consignées au cours des 40 ou 50 dernières années. Il constitue une ressource utile pour les gestionnaires, les pêcheurs, les communautés de pêcheurs et les scientifiques leur permettant de développer des stratégies d'adaptation opportunes.

La modification des propriétés de l'eau de mer est déjà responsable d'une migration massive des espèces de poissons de mer et d'eau de douce, la direction de leur migration n'étant pas aléatoire mais intentionnelle. Les poissons d'eau chaude migrent vers des latitudes plus élevées et plus fraîches. Cela n'est pas directement dû à l'augmentation de la température de l'eau, mais à la réduction de la quantité de phytoplancton, qui constitue l'alimentation de base des poissons de mer, à mesure que la température de l'eau augmente.

Le nombre de morues au large du Groenland, ainsi que de harengs et de sardines japonaises et adriatiques, augmente durant les périodes de réchauffement climatique et diminue nettement au cours des périodes de refroidissement.

De nombreuses espèces de poissons sont actuellement exploitées aux limites de leur capacité à renouveler leur population, et il est à craindre que la pression supplémentaire découlant de la nécessité à s'adapter au changement climatique dépasse la capacité de certaines espèces à se reproduire en nombre suffisant pour survivre.

La destruction des habitats côtiers, notamment des récifs coralliens et des mangroves, est un autre facteur majeur menaçant les populations marines.

Le Programme alimentaire mondial souligne que le poisson assure plus de 15 % de l'apport moyen en protéines pour plus de 2,9 milliards de personnes. Dans les petits États insulaires et certains pays en développement (Bangladesh, Cambodge, Guinée équatoriale, Guyane, Gambie, Ghana, Indonésie et Sierra Leone), le poisson couvre plus de 50 % des apports en protéines animales. Les populations de ces pays dépendent de la pêche, par conséquent toute diminution des captures locales représente un sérieux problème.

L'élévation du niveau de la mer est l'une des modifications du système global résultant du changement climatique et à laquelle il est le plus difficile de s'adapter. Les stratégies visant à promouvoir l'adaptation visent à sensibiliser à l'augmentation attendue du niveau de la mer, à améliorer les systèmes d'alerte précoce et à renforcer la défense côtière et la gestion intégrée des zones côtières.

QUESTIONS

1. Quel pays, entre la Suisse et les Pays-Bas, souffrira le plus en cas d'élévation du niveau de la mer supérieure à 1,5 m ?

2. Pourquoi les côtes maritimes s'érodent-elles plus rapidement ?

3. Qu'est-il arrivé aux îles disparues ?

4. Citez des exemples de l'incidence du changement climatique sur les écosystèmes côtiers.

5. Pourquoi certaines espèces de poissons migrent-elles vers des latitudes plus au nord ?

6. Que peut-on faire pour s'adapter au changement climatique dans les zones côtières ?

EXERCICES

1

Situez la République des Maldives et le Tuvalu sur une carte physique du monde. Déterminez leur altitude au-dessus du niveau de la mer et expliquez pour quelle raison la montée du niveau des océans du monde est si dangereuse pour ces territoires. Trouvez les États insulaires et les régions côtières sur les divers continents qui risquent d'être totalement ou partiellement submergés par la mer au cours des 50 ou 100 prochaines années. Proposez plusieurs moyens de remédier au problème.

2

Indiquez sur une carte isocontour comment l'aspect du continent sud-américain changerait si le niveau des océans montait de 100m : utilisez des crayons de couleur pour colorier les étendues de terre qui disparaitraient sous la mer. Réfléchissez à des noms géographiques à attribuer à ces régions. Qu'arrivera-t-il aux animaux et aux plantes présents sur ces territoires : périront-ils ? Inscrivez vos propositions dans un cahier d'exercice.

3

À l'aide de l'outil Internet OCEANADAPT (http ://oceanadapt.rutgers. edu/), déterminez comment les différentes espèces de poissons présentes aux USA ont changé d'habitat au cours des 40 ou 50 dernières années. Quelles sont les espèces qui ont dû le plus migrer ? Pourquoi ces migrations se produisent-elles ?

2.7 Les effets du changement climatique sur **les régions montagneuses**

Qu'est-ce que les montagnes ?

« Que sont les hommes aux rochers et aux montagnes ? » s'est exclamée Elizabeth Bennet, l'héroïne du roman Orgueil et Préjugés de Jane Austen, enthousiasmée par son exploration à venir des plaisirs de la nature en été. Il est vrai que les montagnes sont l'une des plus belles créations de la nature. Rien n'est comparable au sentiment étonnant qui s'empare de vous lorsque vous êtes au sommet d'une montagne, avec au-dessus de vous le seul ciel bleu, et sous vos pieds le reste du monde, qui vous paraît alors si petit depuis les blancs nuages. À ces moments-là, vous ressentez la beauté et le pouvoir de la nature, et en même temps sa fragilité.

Les scientifiques définissent les montagnes comme une forme de relief élevé qui se dresse au-dessus des plaines environnantes. À moins qu'il ne s'agisse de volcans, les montagnes sont rarement isolées, et font généralement partie de chaînes et de crêtes montagneuses. Les chaînes montagneuses, quant à elles, se regroupent pour former des pays ou systèmes montagneux.

Les montagnes peuvent être hautes (plus de 3 000 m), moyennes (1 000 à 3 000 m) et basses (moins de 1 000 m). Les basses montagnes se caractérisent généralement par ses sommets arrondis et des pentes douces, tandis que les hautes montagnes possèdent des pentes abruptes et des pics angulaires.

Montagnes et climat

Les montagnes jouent un rôle important dans la détermination du climat. Elles constituent une barrière aux masses d'air, qui ne peuvent aisément passer les hauts sommets. C'est la raison pour laquelle les différents versants d'une même montagne bénéficient souvent de conditions climatiques différentes, avec plus de précipitations d'un côté que de l'autre. Les températures moyennes et les paysages peuvent également varier significativement.

Les montagnes se distinguent également en ce sens qu'elles regroupent un grand nombre de climats différents sur une surface restreinte : le climat et les paysages varient à différents niveaux du bas de la montagne au sommet. (Fig. 2.7.1). On les appelle les « zones altitudinales » (« altitude » signifiant « hauteur »).

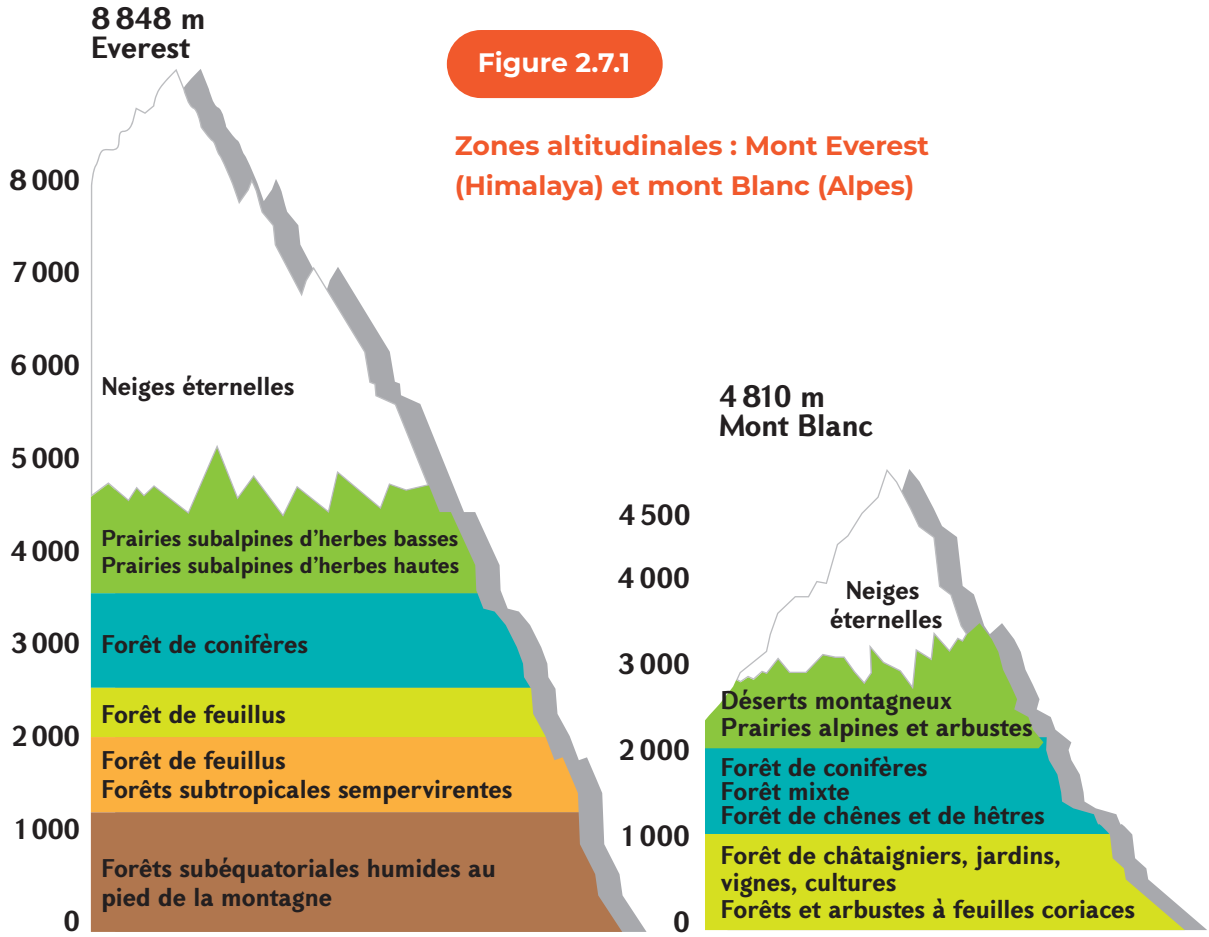


Figure 2.7.1

Zones altitudinales : Mont Everest (Himalaya) et mont Blanc (Alpes)

Les plus hautes montagnes du monde

La plus haute chaîne de montagnes du monde est l'Himalaya, qui en sanskrit signifie « demeure des neiges ». Dix des douze montagnes culminant à plus de 8 000 m d'altitude s'y trouvent, dont le sommet le plus haut du monde : le mont Everest, également appelé Chomolungma ou Sagarmatha en langues locales. Le mont Everest s'élève à 8 848 m.

Les Andes sont, pour leur part, la chaîne de montagnes la plus longue de la planète. Cette immense chaîne de montagnes sud-américaines s'étend tout le long de la côte pacifique du continent. Le point le plus haut des Andes et des hémisphères Ouest et Sud du globe est le mont Aconcacuaga (6 960 m).

Le système montagneux le plus important d'Europe est la chaîne de montagnes des Alpes, qui couvre huit pays : Autriche, Allemagne, Italie, Liechtenstein, Monaco, Slovénie, France et Suisse. Le mont Blanc (4 807 m), à la frontière entre la France et l'Italie, est le sommet le plus élevé des Alpes et d'Europe de l'Ouest. Le plus haut sommet du continent européen est le volcan Elbrouz (5 642 m), possédant deux pics principaux, situé dans le Grand Caucase. C'est également le plus haut sommet de Russie.

L'Amérique du Nord possède un système de chaînes de montagnes, dont les montagnes les plus élevées sont la crête de l'Alaska et les Montagnes Rocheuses. L'Alaska possède le plus haut sommet d'Amérique du Nord et des États-Unis, le mont McKinley (6 193 m). Le président américain Barack Obama a annoncé, le 31 août 2015, que le mont McKinley allait être rebaptisé Denali, comme le nomment les autochtones d'Alaska.

La montagne la plus élevée d'Afrique est le Kilimandjaro (5 895 m). La montagne la plus élevée d'Australie est le mont Kosciuszko (2,228 m).

Figure 2.7.2

N. Roerich. ***Himalaya.***
Everest. 1938

Figure 2.7.3

Le volcan Elbrouz à deux pics (5 642 m) – le plus haut sommet d'Europe

Vous vous êtes probablement déjà demandé pourquoi les sommets des montagnes sont souvent recouverts de neige, même sous les latitudes tropicales. Les premiers alpinistes se sont rapidement aperçus que plus ils montaient haut, plus la température baissait et la respiration devenait difficile. L'air est chauffé par le soleil et par la surface de la terre. Une fois chaud, il s'élève et se diffuse, perdant ainsi de sa chaleur. Par conséquent, quand l'altitude augmente, la pression de l'air et sa température chutent progressivement.

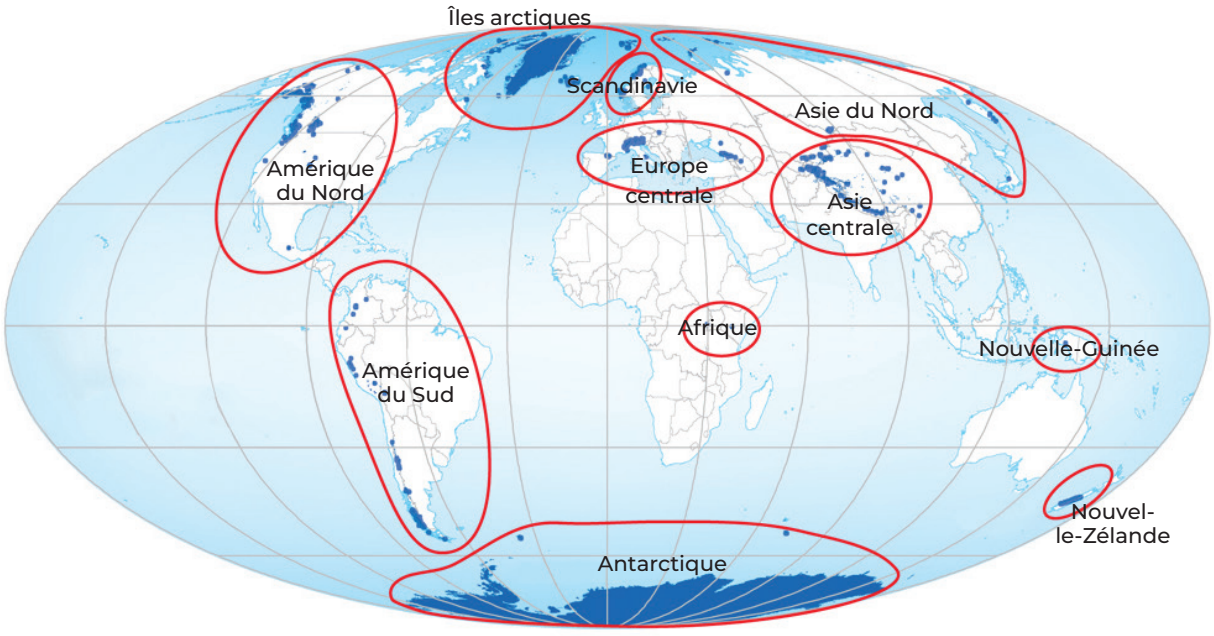
En altitude, la température chute en moyenne de 6 °C par kilomètre au-dessus de la surface de la Terre. En conséquence, si la température au pied d'une montagne de 4 000 m est de +24 °C, la température au sommet sera d'environ 0 °C. C'est pourquoi, même si la température moyenne de l'air sous les tropiques ne chute jamais en dessous de zéro, il y a encore de la neige à haute altitude sur les montagnes.

Les montagnes ont une incidence sur le climat, mais elles en sont également fortement dépendantes. Les régions montagneuses figurent parmi les premières à réagir à l'évolution des conditions climatiques. Les principaux « indicateurs » du changement climatique dans les montagnes sont les glaciers, qui se rétrécissent ou grossissent selon que le climat est plus chaud ou plus froid.

Une beauté qui fond

Les glaciers se forment dans les chaînes montagneuses lorsque l'accumulation de neige dans les parties supérieures des montagnes se transforme en glace. La formation d'un glacier requiert un climat froid et humide, dans lequel les chutes de neige sont plus abondantes durant l'année que les fontes. Dès que les températures augmentent et que les précipitations diminuent, le glacier cesse de grossir et commence à fondre.

Figure 2.7.4 Régions glaciaires de la Terre



Les glaciers des montagnes du monde entier ont commencé à fondre (à « se retirer ») il y a environ 15 000 ans, lorsque la dernière période glaciaire a laissé place à une nouvelle période de réchauffement climatique. Ce processus de fonte s'est accompagné de brèves périodes durant lesquelles les glaciers ont de nouveau progressé. L'histoire nous a appris qu'entre le Ve siècle et le VIIe siècle Après J.C., de nombreux cols de montagnes aujourd'hui occupés par des glaciers servaient de routes caravanières. Le climat s'est ensuite refroidi, les glaciers ont commencé à grossir, et aux XVII^{e} et XVIII^{e} siècles, ces cols sont devenus impraticables.

Par exemple, le célèbre col du Saint-Gothard dans les Alpes. Comme le poète Friedrich Schiller l'a écrit en 1799 : « Le sentier qui donne le vertige conduit au bord de l'abîme ; il serpente entre la vie et la mort », la traversée d'un col enneigé était extrêmement dangereuse et n'était possible que durant les mois d'été.

Figure 2.7.5 **W. Rothe. *La traversée du col du St. Gotthard*, 1790**

Cependant, au cours des 70 dernières années, les glaciers du monde entier ont reculé particulièrement vite (Fig. 2.7.6). Les scientifiques tirent le signal d'alarme : la rapide fonte des glaciers des montagnes, à laquelle nous assistons aujourd'hui, ne correspond pas à un cycle naturel. La réduction du volume des glaciers des montagnes pourrait avoir des conséquences catastrophiques pour l'environnement et l'économie des régions montagneuses, ainsi que des plaines avoisinantes, qui hébergent un sixième de la population mondiale.

Figure 2.7.6

Modification de la masse des glaciers à travers le monde, 1950-2022, mesurée en unités de mètre équivalent eau (m.e.e.)

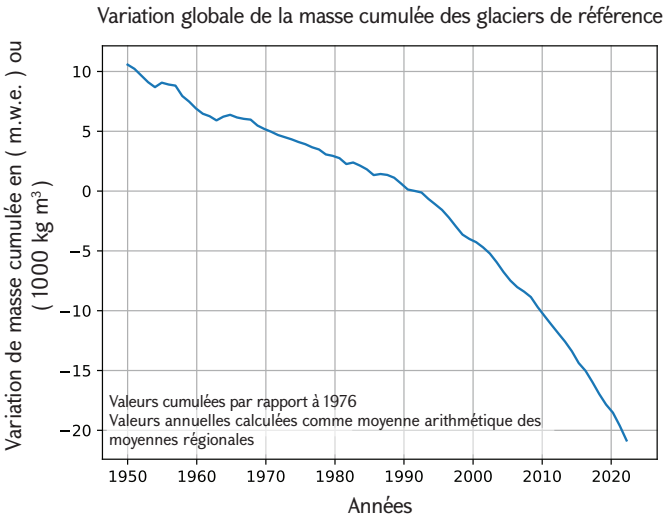


Figure 2.7.7

C'est ainsi que les scientifiques étudient les glaciers

Les glaciers de montagne reculent

Les glaciers de l'Himalaya reculent de 10 à 15 m par an en moyenne. Le glacier Gangotrî, qui constitue la source du Gange, fond particulièrement vite et opère un recul de 30 m chaque année. Le Gangotrî représente l'une des principales sources d'eau pour les 500 millions de personnes qui vivent le long du Gange.

Au Pérou, les glaciers se retirent également à vive allure. Selon les estimations les plus prudentes, leur superficie aurait diminué d'un tiers au cours des 30 dernières années.

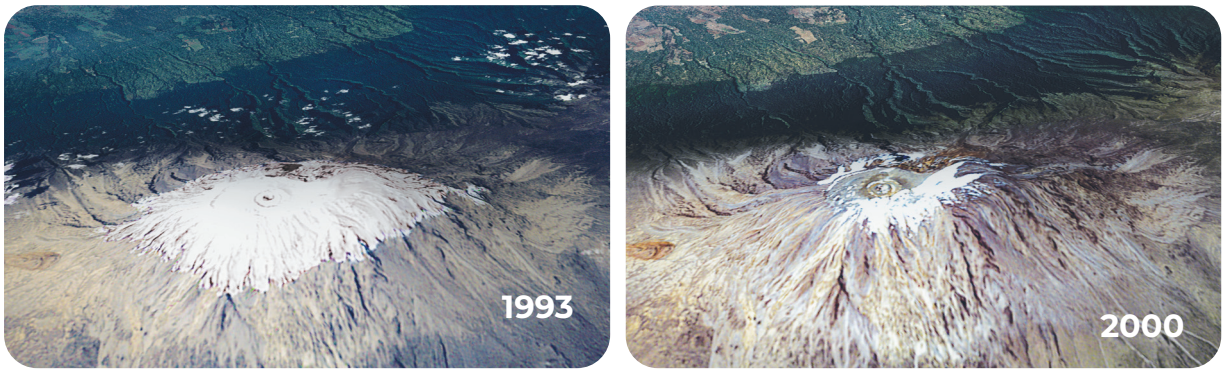
Le volcan africain Kilimandjaro, est peut-être celui à avoir le plus souffert : sa célèbre calotte glaciaire, immortalisée dans le roman d'Ernest Hemingway intitulé « Les Neiges du Kilimandjaro », a presque entièrement disparu.

Figure 2.7.8

Le glacier Gangotri

Figure 2.7.9

La calotte glaciaire et la neige du Kilimandjaro ont presque entièrement fondu



Les glaciers des Alpes fondent plus rapidement que jamais. Selon une étude menée en 2023 par le groupe scientifique Glacier Monitoring Switzerland (GLAMOS), les glaciers suisses ont perdu autant de glace en deux ans qu'au cours des trois décennies précédant 1990 : il a suffi de deux étés chauds en 2022 et 2023 pour que les glaciers alpins perdent le même volume de neige qu'entre 1960 et 1990. Les scientifiques ont conclu que la dégradation du climat provoquée par la combustion de combustibles fossiles est à l'origine d'étés et d'hivers inhabituellement chauds avec un très faible volume de neige, ce qui a accéléré la fonte des glaciers. L'Agence européenne pour l'environnement estime que 75 % des glaciers alpins auront fondu d'ici 2050.

Au milieu du XIXe siècle, le parc national de Glacier situé dans les Montagnes Rocheuses, à la frontière des États-Unis et du Canada, comptait auparavant 150 glaciers. Au début du XXIe siècle, il n'en restait que 25 et selon les scientifiques, ces glaciers auront entièrement disparu du parc au cours des prochaines décennies, par conséquent les visiteurs qui souhaiteraient voir pourquoi ce parc était réputé devrait se dépêcher !

Figure 2.7.10 **Parc national de Glacier en août 2013**

Le volume des glaciers néo-zélandais a diminué de 11 % entre 1975 et 2005. Les glaciers victimes de la fonte la plus rapide dans ce pays insulaire sont le Tasman, le Classen, le Mueller et le Maud.

Figure 2.7.11

Le glacier Grand Azau dans le Caucase. La photographie tenue par la jeune femme date de 1956. Derrière elle se trouve ce qui restait du glacier en 2007

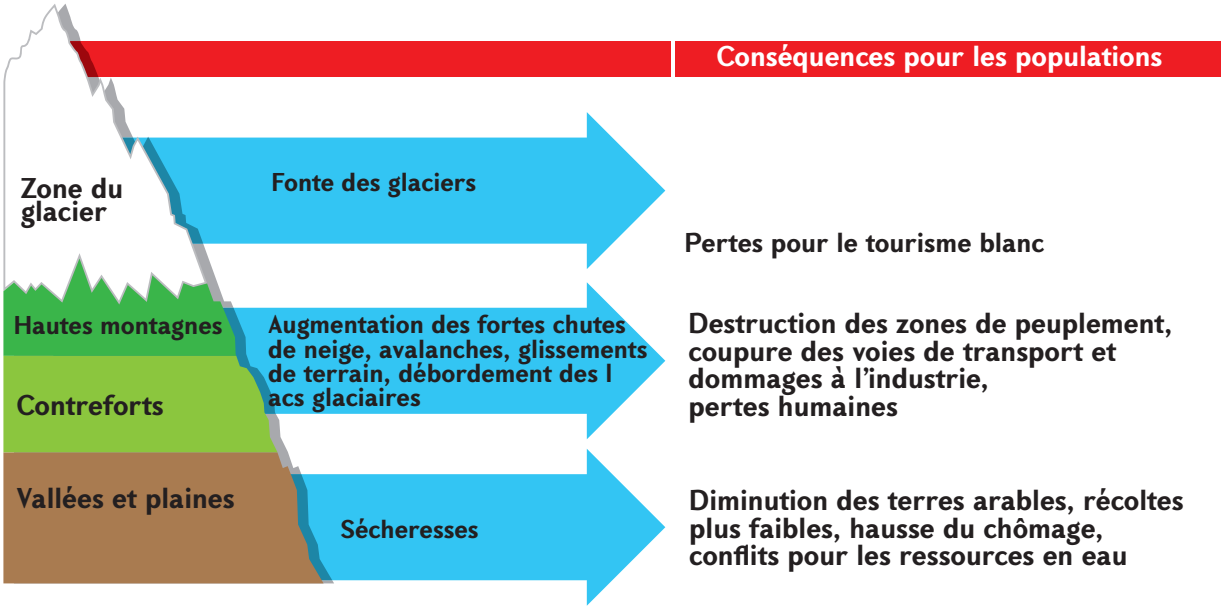
Le glacier Azau dans le Caucase a subi d'importants changements. À la fin du XIX^{e} siècle, le processus de fonte a entraîné la séparation du glacier en deux parties, appelées le Petit Azau et le Grand Azau. Aujourd'hui, le Grand Azau n'a plus rien de grand. De 1957 à 1976, le glacier a reculé de 360 m, puis encore de 260 m entre 1980 et 1992. Le Petit Azau se retire d'environ 16 m chaque année.

Le nombre de glaciers dans les montagnes de l'Altaï en Russie orientale a diminué de 7,5 % entre 1952 et 1998, et ceux qui demeurent ont reculé de 100 à 200 m par rapport à leur position au milieu du XIX^{e} siècle. Le glacier Sofia, placé sous observation par les experts de l'Université d'État de l'Altaï, a reculé de 1,5 ou 2 km au cours des 150 dernières années. Ce glacier « s'élève » également de 20 à 30 m chaque année.

Les effets du changement climatique sur les populations vivant dans les montagnes

Vivre en montagne n'est pas chose facile. L'altitude élevée, la complexité du terrain et les conditions météorologiques souvent changeantes rendent la production de denrées et l'élevage du bétail bien plus difficiles sur ce terrain que dans les plaines.

Figure 2.7.12 Impact du changement climatique sur la vie dans les montagnes



Depuis les temps les plus anciens, les populations s'installent dans les étroites vallées des montagnes, séparées les unes des autres par des chaînes de montagnes aux pentes abruptes rendant souvent très difficiles les contacts avec les vallées (et populations) voisines. Encore aujourd'hui, les populations vivant dans les régions montagneuses possèdent souvent leurs propres coutumes, culture et moyens de subsistances. Le mode de vie des populations des montagnes et leurs principaux moyens de subsistance (agriculture et tourisme) dépendent directement du climat. Même de légers changements climatiques peuvent avoir une incidence sur le bien-être des populations des régions montagneuses.

Détérioration du tourisme

L'exemple des Alpes confirme la façon dont le changement climatique affecte le tourisme dans les régions montagneuses. Actuellement, le tourisme blanc compte pour 20 % des revenus des pays alpins (Fig. 2.7.13). Pour les 13 millions de personnes vivant dans les Alpes en Autriche, en Allemagne, en Suisse et en France, le manque de neige est une véritable catastrophe économique : deux tiers des touristes qui s'y rendent le font pour profiter des plaisirs du ski et du snowboard.

Les prévisions sont alarmantes : d'ici 2030, il n'y aura quasiment plus aucune chute de neige dans les Alpes en-dessous de 1 000 m d'altitude, ce qui contraindra de nombreuses stations de ski populaires à fermer. La moitié des stations de ski autrichiennes se situent à moins de 1 300 m d'altitude, et seront contraintes de fermer à cause du manque de neige. Les prévisions les plus pessimistes ont déjà commencé à se réaliser : à l'hiver 2006-2007, 60 des 660 stations de ski alpines sont restées fermées et de nombreuses autres n'ont pu fonctionner qu'à l'aide de neige artificielle, ce qui a grandement augmenté leurs coûts déjà élevés. Il en a résulté une baisse de la demande de vacances dans les Alpes.

Comment les régions montagneuses peuvent-elles s'en sortir sans neige ? L'industrie des sports et loisirs s'adapte du mieux qu'elle peut, en tentant de développer d'autres types d'activités touristiques et récréatives moins dépendantes des conditions neigeuses. Les espaces auparavant utilisés pour skier sont transformés en parcs de loisirs et stations thermales ouvertes tout au long de l'année. Il se pourrait qu'un jour les gens viennent dans les Alpes, non pas pour les sports d'hiver, mais pour profiter de promenades autour des lacs de montagne, se délecter de la nourriture locale et respirer l'air frais de la montagne.

Figure 2.7.13

L'industrie du tourisme représente une part importante des revenus des régions de montagne

Le lac de Trift, dans le canton suisse de Bern, illustre parfaitement les conséquences du réchauffement climatique sur les Alpes. Dans les années 1990, un glacier voisin a commencé à rapidement rétrécir, l'eau de fonte a donné naissance à un petit lac et une plus grande superficie de la vallée s'est délestée de sa glace. Auparavant, les gens pouvaient passer d'un pic de la montagne à l'autre à pied, en traversant le glacier. Les autorités locales ont décidé de construire un pont suspendu pour les promeneurs avant que le glacier n'ait complètement fondu, et le pont est rapidement devenu une attraction majeure, attirant des visiteurs du monde entier

Figure 2.7.14

Pont surplombant le lac de Trift, Suisse

Retrait du glacier Pastoruri au Pérou

Jusqu'à récemment, les touristes et les alpinistes professionnels pouvaient affluer sur le glacier Pastoruri, qui domine les Andes au Pérou. Cependant, le glacier a diminué d'un quart au cours des 35 dernières années et, de l'avis des scientifiques, pourrait entièrement disparaître au cours des prochaines décennies. Un magnifique paysage de neige et de glace a laissé la place à de noires falaises. Les autorités locales ont interdit l'escalade en raison de l'instabilité des roches associée à la fonte du glacier.

Le nombre de touristes venus admirer le glacier Pastoruri est trois fois moins élevé qu'au début des années 1990, ce qui a eu une incidence majeure sur le tourisme au Pérou et les revenus des résidents locaux. Néanmoins, les entrepreneurs péruviens ne désespèrent pas : ils exposent désormais les restes du glacier afin de témoigner des résultats du changement climatique, et la région est parvenue à attirer un nombre croissant d'écologistes et de touristes curieux.

Toutefois, le sauvetage du glacier lui-même est une tâche bien plus ardue que le sauvetage des revenus des entreprises locales.

Figure 2.7.15 **Retrait du glacier Pastoruri dans les Andes péruviennes**

Catastrophes naturelles dans les montagnes

Le déclin de l'activité touristique ne constitue pas, pour les peuples montagnards, la menace la plus meurtrière du réchauffement climatique. Ils doivent également craindre les catastrophes naturelles (avalanches, glissements de terrain et inondations), qui sont devenues bien plus fréquentes dans les montagnes en raison des évolutions climatiques et constituent une véritable menace pour la vie humaine, en plus d'occasionner d'importants dommages à l'économie locale.

Lorsqu'un glacier se retire, il produit une importante quantité d'eau de fonte, laquelle s'accumule dans une vallée montagneuse et forme un lac glaciaire. À mesure que la quantité d'eau augmente, le lac peut déborder et provoquer une inondation. Selon les scientifiques, les 20 lacs glaciaires que compte le Népal et les 24 que compte le Bhoutan constituent une grave menace pour les populations installées en contrebas dans la vallée. Si ces lacs étaient amenés à déborder, et que l'eau se déversait dans la vallée, de nombreuses personnes risqueraient de perdre la vie ou du moins leurs foyers. Plusieurs inondations de ce type se sont déjà produites ces dernières années dans les vallées de Thimphou, Paro et Punakha-Wangdu au Bhoutan.

Les risques pour la population locale peuvent être réduits en creusant des canaux de protection et en construisant des barrages avant que de telles inondations ne se produisent.

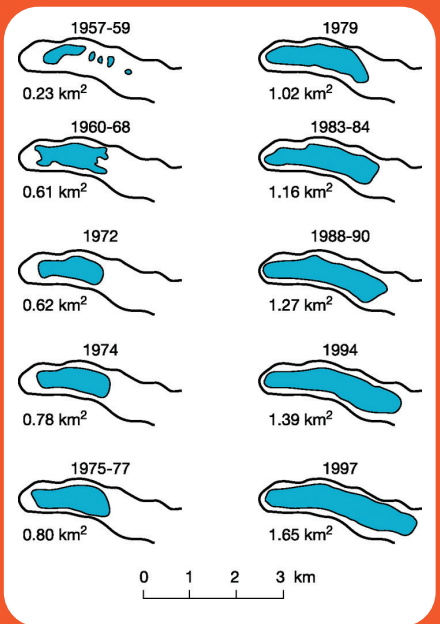
Le volume du lac Tsho Rolpa au Népal, qui a été formé par l'eau issue de la fonte des glaciers, a septuplé au cours des 50 dernières années. Selon certaines études, les 20 lacs glaciaires du Népal et les 24 du Bhoutan pourraient bientôt déborder, ce qui aurait des conséquences catastrophiques sur les populations et les économies de ces pays, à moins que des mesures appropriées ne soient prises.

Figure 2.7.16

Lacs glaciaires dans l'Himalaya

Figure 2.7.17

La taille du lac Tscho Rolpa s'est multipliée par sept au cours des 50 dernières années



Une **avalanche** est une immense masse de neige qui se détache puis dévale un versant de montagne. Les avalanches peuvent avoir des conséquences désastreuses. En février 1999, une avalanche d'un poids de 170 000 tonnes a complètement détruit le village autrichien de Galtür et coûté la vie à 30 personnes. En mars 2012, une série d'avalanches en Afghanistan a détruit des maisons et fait plus de 100 morts. Plus récemment, en janvier 2023, une avalanche a frappé une route à Nyingchi, en Chine, tuant 28 personnes et en blessant 53 autres.

Un **glissement de terrain** est une masse de boue et de pierres extrêmement puissante, qui dévale subitement les vallées fluviales montagneuses. Les glissements de terrain sont généralement causés par de fortes précipitations ou une rapide fonte des neiges. Ils peuvent également être causés par le débordement des lacs glaciaires. Les glissements de terrain, tout comme les avalanches, peuvent entraîner une destruction massive.

Diminution des réserves d'eau douce

La future diminution des réserves d'eau douce, tant dans les régions montagneuses que dans les plaines adjacentes, constitue une sérieuse menace. Les glaciers sont l'une des principales sources d'eau douce sur Terre, car ils constituent la source de nombreux fleuves et rivières. La fonte de la glace entraînera donc des pénuries d'eau dans les régions proches des montagnes, ce qui compliquera grandement les conditions de production agricole, d'exploitation minière et de production d'électricité. Les pénuries d'eau douce dans les régions proches des montagnes entraînent déjà de graves conflits politiques dans certaines parties du monde. Les scientifiques notent que les impacts du changement climatique sur les montagnes, tels que les changements hydrologiques résultant du retrait des glaciers ou certains changements dans les écosystèmes, ne peuvent être réduits par des mesures d'adaptation.

Les montagnes ont toujours représenté un risque, et le changement climatique sur Terre pourrait ajouter à ces risques. La hausse des températures, la variation de la quantité de précipitations, la fonte des glaciers des montagnes et les catastrophes naturelles de plus en plus fréquentes pourraient avoir des conséquences catastrophiques sur l'environnement, les populations et l'économie des régions montagneuses et des régions avoisinantes.

QUESTIONS

1. Quelle est l'altitude atteinte par un alpiniste si celui-ci se trouve à une altitude où la température est de -9 °C alors que celle-ci est de 18 °C au pied de la montagne ?

2. La neige restera-t-elle au sommet d'une montagne culminant à 5 200 m de haut, si la température de l'air au pied de celle-ci est de +30 °C en été durant les jours les plus chauds ?

3. Pourquoi les glaciers sont-ils souvent qualifiés d'indicateurs du changement climatique ?
Que leur arrive-t-il lorsque la température de l'air change ?

4. Pourquoi y a-t-il souvent beaucoup de diversité ethnique dans les régions montagneuses ?

5. Quels sont les principaux moyens de subsistance des populations vivant dans les régions montagneuses. Comment sont-elles affectées par le changement climatique ?

6. Que peut-on faire pour préserver les principaux moyens de subsistance des personnes vivant dans les régions de montagne et s'adapter aux conséquences du changement climatique ?

EXERCICES

1

Sur une carte du monde isocontour, marquez les plus hauts sommets sur chaque continent. À quel système montagneux appartiennent-ils ? Dans quels pays se situent-ils ?

2

La beauté et l'inaccessibilité des montagnes en ont toujours fait une source d'inspiration pour les plus grands poètes, écrivains, artistes et compositeurs. Citez des œuvres littéraires ou artistiques célèbres portant sur des chaînes de montagnes ou des sommets montagneux. Choisissez une œuvre que vous aimez particulièrement et expliquez les modifications que son auteur aurait dû apporter s'il avait vécu une période de changement climatique mondial. Comment aurait-il pu le faire ?

3

Jeu
Les joueurs se divisent en deux équipes.

L'équipe № 1 vit à High Village, situé dans la vallée montagneuse de la rivière Rapide. Ces dernières années, la fonte des glaciers des hautes montagnes a entraîné, à plusieurs reprises, le débordement de la rivière Rapide, ce qui a occasionné des problèmes aux résidents locaux. Les habitants locaux souhaitent construire un barrage sur la rivière afin de se protéger des inondations et, dans le même temps, produire de l'électricité et créer de nouveaux emplois. Les habitants de la montagne ne sont pas fortunés, ils n'ont pas d'argent pour la construction du barrage et vivent principalement de l'agriculture et de l'élevage. Ces dernières années, en raison de la hausse des températures, les habitants de High Village ont commencé à cultiver des fleurs et des fruits exotiques.

L'équipe № 2 vit dans le village de Cowgrazing, situé dans la plaine au pied des montagnes, en aval de la rivière Rapide. Le village est prospère, ses habitants sont des agriculteurs et utilisent l'eau de la rivière aux fins d'irrigation et de consommation. Les habitants de Cowgrazing aiment la nourriture exotique, les divertissements et les voyages. Le budget local de Cowgrazing est suffisamment élevé pour financer de nouveaux projets de construction.

Les membres des différentes équipes doivent débattre des questions suivantes (l'enseignant ou l'un des élèves joue le rôle du Ministre en charge du développement régional, qui mènera les négociations) :

1) Quelles seront les conséquences pour le village de Cowgrazing, si les habitants de High Village construisent un barrage sans les consulter ?

2) Sous quelles conditions le village de Cowgrazing peut-il accepter la mise en place du barrage et financer sa construction ?

3) Les habitants de High Village peuvent-ils trouver un moyen de se protéger des conséquences du changement climatique sans construire de barrage ?

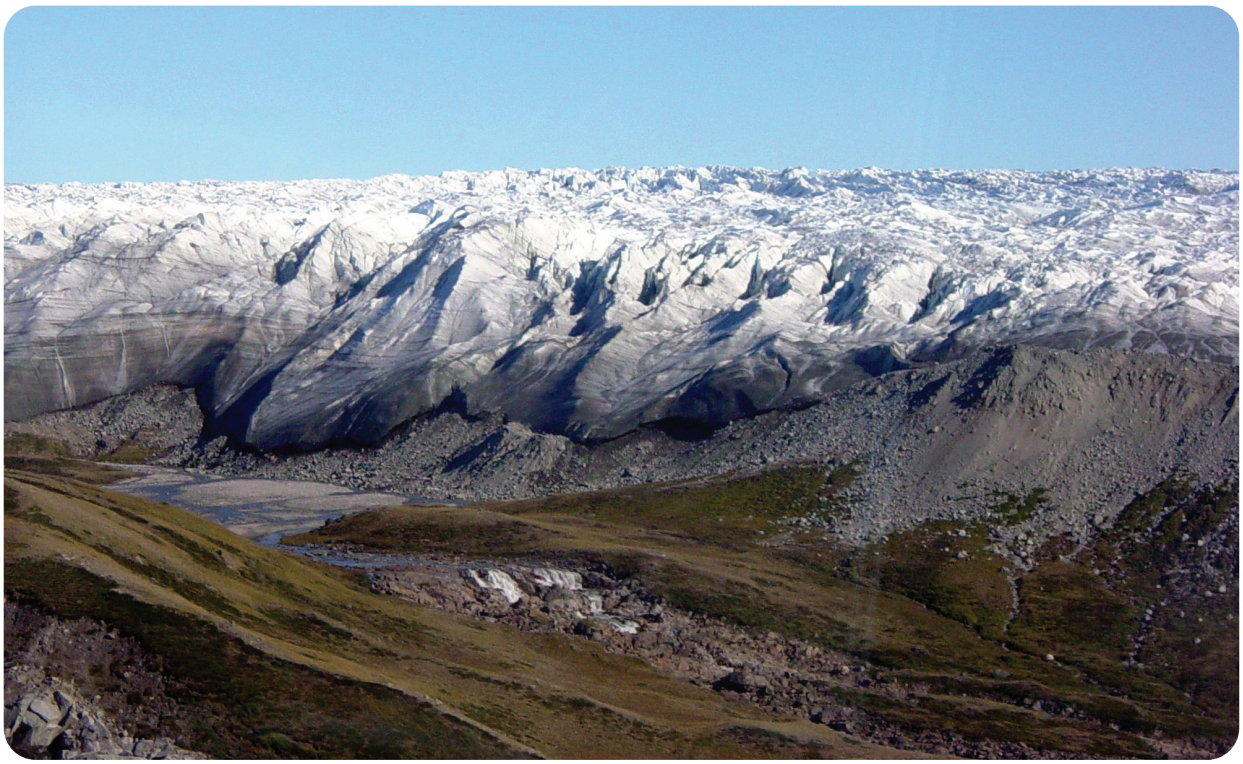
4) Quels nouveaux projets et nouvelles activités les habitants de High Village et Cowgrazing peuvent-ils mener ensemble ?

2.8 Les effets du changement climatique sur **les régions arctiques**

L'Arctique est la région polaire nord de la Terre, laquelle comprend l'océan Arctique et ses mers, les régions nord des océans Pacifique et Atlantique, l'archipel Arctique canadien, le Groenland, les îles Svalbard, la terre François-Joseph, la Nouvelle-Zemble, la Terre du Nord, les îles de Nouvelle-Sibérie et l'île Wrangel, ainsi que les côtes nord de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord.

Il n'y a pas de limites clairement définies dans la région Arctique. La limite sud généralement admise est donnée par le cercle arctique se trouvant à 66 degrés et 33 minutes de latitude nord. Dans ce cas, la superficie totale de l'Arctique s'élève à 21 millions de km 22 (Fig. 2.8.1).

La seconde délimitation de la région arctique correspond à l'isotherme de juillet, une ligne fictive où les températures au cours du mois le plus chaud de l'année ne dépassent pas les 10 °C. La limite forestière correspond à peu près à l'isotherme de juillet et constitue la troisième délimitation de l'Arctique. La limite forestière marque la transition entre les territoires forestiers et les arbustes et herbes de la toundra. La Russie, les États-Unis (Alaska), le Canada, la Norvège, la Suède, la Finlande, l'Islande et le Danemark (Groenland) possèdent tous des territoires dans l'Arctique

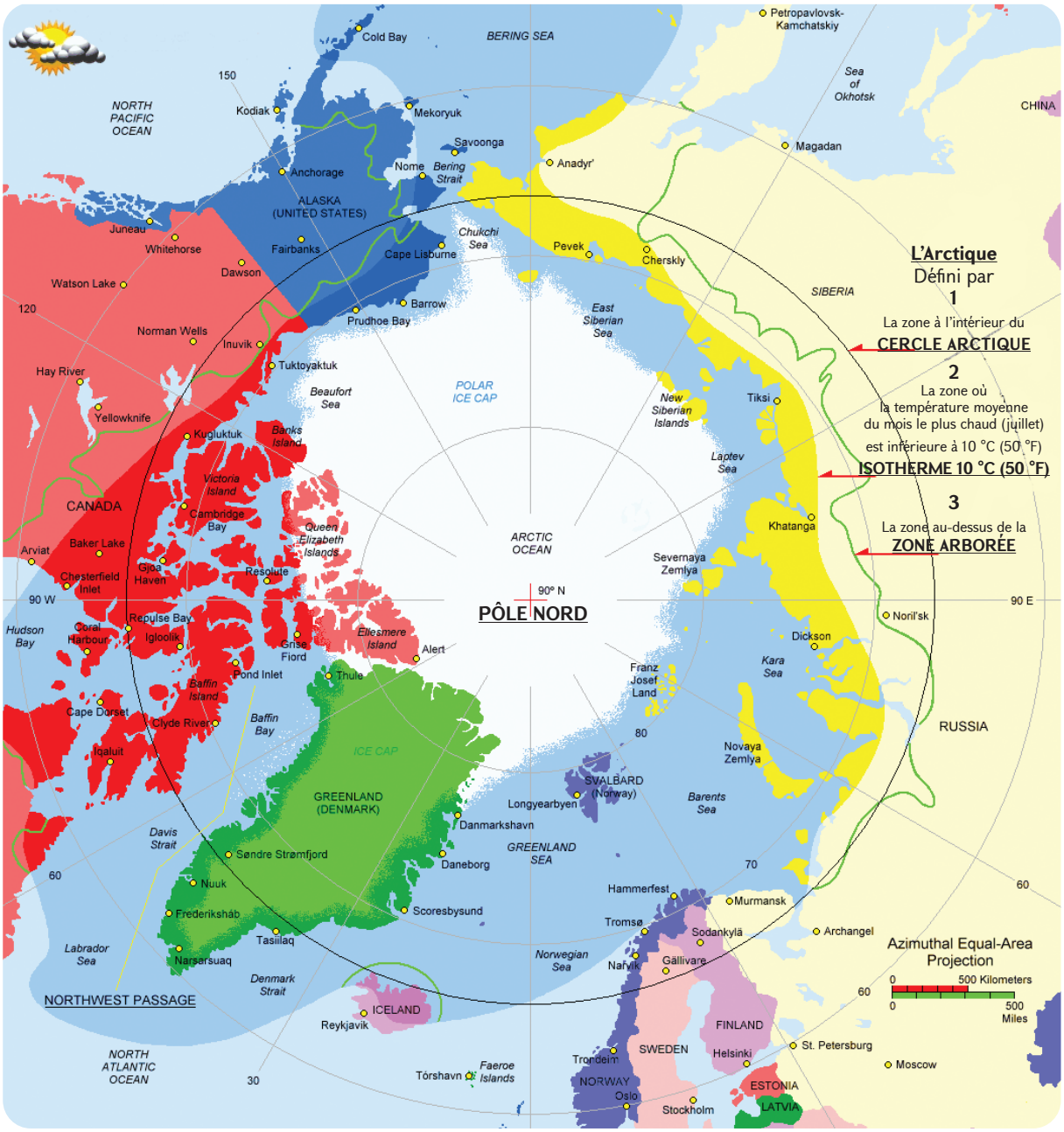


L'Arctique se réchauffe plus vite que le reste du monde

Le changement climatique dans l'Arctique est bien plus prononcé que dans le reste du monde. Les températures le long de la côte arctique ont déjà augmenté de 2 ou 3 °C au cours des dernières décennies.

Toutefois, l'effet le plus notable du changement climatique en Arctique est la hausse des fluctuations climatiques et météorologiques. Dans les régions tempérées, les variations soudaines de température ne sont généralement pas supérieures à 10 °C : il peut faire très chaud au cours d'une journée, mais le lendemain les températures chutent de 10 °C, puis augmentent de nouveau de 10 °C une semaine plus tard. Cependant, dans l'Arctique, la température peut subitement enregistrer des variations allant jusqu'à 20 °C, et il arrive régulièrement qu'en été les températures de l'une des régions de l'Arctique soient supérieures de 5 °C à ce qu'elles étaient au milieu du XXe siècle, tandis que dans une région voisine, elles sont 5 °C plus basses.

Figure 2.8.1 L'Arctique et la définition de ses limites



On pourrait penser que le réchauffement de l'Arctique est une bonne chose, mais pas du tout ! Qu'est-ce qui est le mieux : une température de -35 °C avec un temps dégagé et sans vent, ou une température de -20 °C avec un blizzard ? Bien sûr, plus il fait froid mieux c'est, mais sans blizzard, notamment car l'Arctique est une région habituée à de telles températures. Le problème n'est pas la température en tant que telle : quoi qu'il se passe, les températures de l'Arctique ne seront jamais suffisamment élevées pour que les hommes et les animaux qui y vivent souffrent de la chaleur.

Il existe un concept en météorologie, appelé l'indice de refroidissement éolien, qui reflète la sensation de froid produite par l'effet combiné du vent et de températures basses que ressent une personne. Par exemple, avec une température de -10 °C et un vent de 30 km/h, l'indice de refroidissement éolien sera de -20 °C, ce qui signifie que la sensation ressentie par une personne et la manière dont son organisme réagira dans ces conditions sera la même que si l'air était à une température de -20 °C.

La vie des hommes et des écosystèmes de l'Arctique est affectée par différents paramètres climatiques : la force du vent (blizzards et tempêtes), la réduction des glaces de mer et de rivière, la grave érosion des côtes et la fonte du pergélisol. La modification de ces paramètres n'est pas uniquement la conséquence de la hausse des températures ; les paramètres eux-mêmes sont des forces actives qui contribuent à l'augmentation des températures. Les scientifiques appellent cela l'effet de « rétroaction ». Il en existe au moins deux :

1. Des températures de l'air plus élevées entraînent la fonte et l'éclatement des champs de glace, laissant ainsi la place à de vastes étendues d'eau entre les îlots de glace. La surface sombre de l'eau, contrairement à la glace, ne réfléchit pas mais absorbe le rayonnement solaire, par conséquent l'eau se réchauffe, davantage de glace fond et le processus est accéléré.

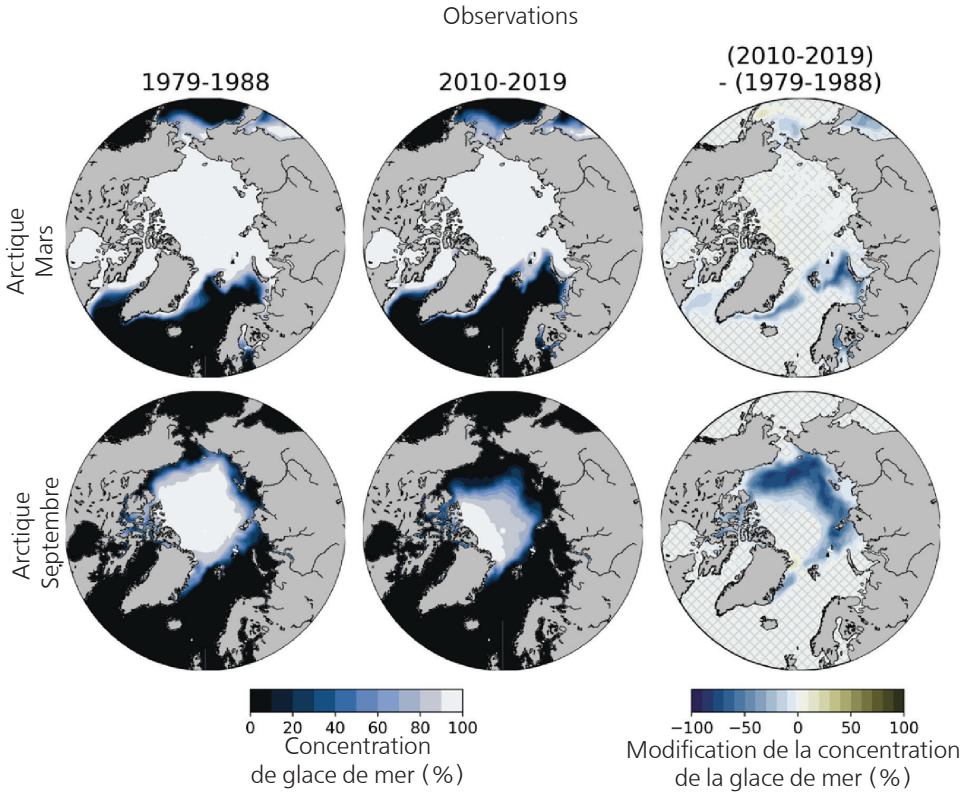
2. Une quantité d'eau plus importante implique une plus grande évaporation de l'humidité et davantage de nuages. Souvenez-vous, les nuits sont relativement douces lorsque le ciel est nuageux, car les nuages retiennent la chaleur, et il fait bien plus froid par nuit claire. De même, en Arctique, lorsque le temps est couvert et qu'il y a une importante quantité d'eau, la température est plus élevée, notamment la nuit, ce qui accélère la fonte des glaces.

L'économie de l'Arctique repose sur deux types d'activités polaires. D'une part, les activités traditionnelles des populations indigènes, comme la chasse, la pêche, l'élevage de rennes. D'autre part, la production à grande échelle de pétrole et de gaz naturel, de fer, de zinc, d'or, de diamants, de poisson et de bois pour le marché international. Les plus grandes économies de l'Arctique sont celles de la Russie et de l'Alaska (USA), notamment grâce à leurs activités minières et pétrolières. Les régions encore dominées par des activités plus traditionnelles et à petite échelle, notamment le Groenland et le nord du Canada, ont une activité économique nettement inférieure.

La fonte des glaces de l'Arctique

Les scientifiques suivent de près l'état de la glace en Arctique depuis 1979 grâce à des satellites. Les données satellite indiquent que la quantité de glace dans l'Arctique a considérablement diminué (Fig. 2.8.2). Les cartes de la glace de mer arctique montrent la concentration moyenne de glace de mer obtenue par satellite au cours des décennies 1979-1988 et 2010-2019, ainsi que le changement absolu de la concentration de glace de mer entre ces deux décennies. Au cours des 40 dernières années, la concentration de glace de mer dans l'océan Arctique et ses mers a diminué de plus de 20 %.

Figure 2.8.2 **Cartes de la concentration de glace de mer dans l'Arctique pour mars et septembre, qui correspondent généralement respectivement aux mois de superficie maximale et minimale de glace de mer**



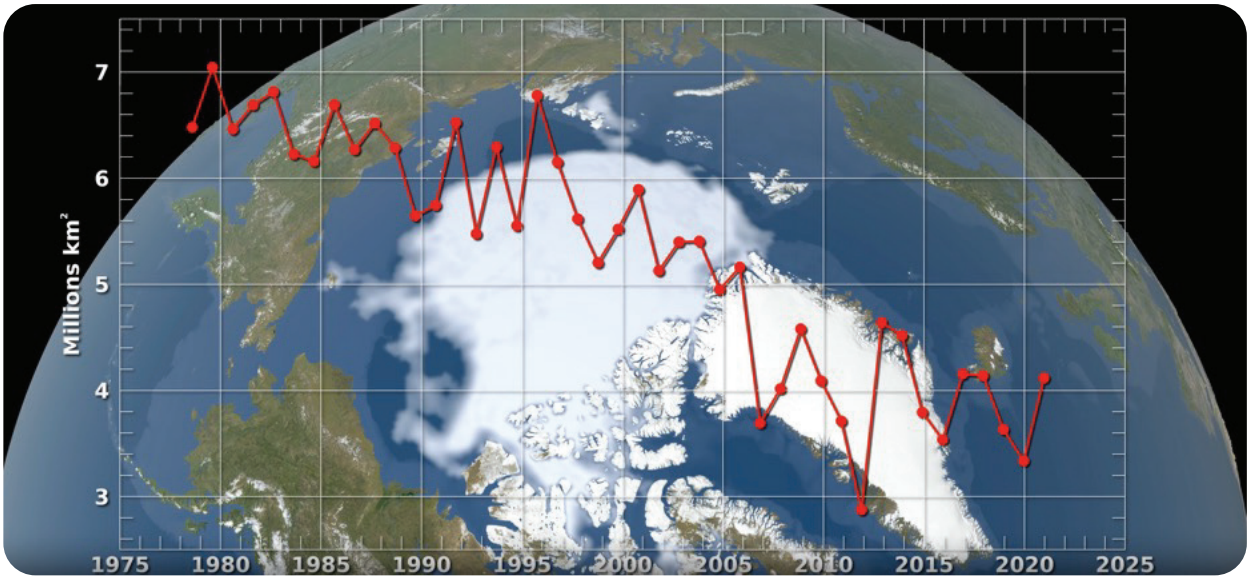
La superficie de la couverture glaciaire est généralement mesurée au moment du minimum et du maximum de son extension, normalement à la fin du mois de mars et fin septembre. Le rétrécissement observé en septembre 2012 est un record absolu : la superficie de la couverture glaciaire a reculé à 3,41 millions km² (Fig. 2.8.2 et 2.8.3).

Bien sûr, la glace recouvre toujours la totalité de l'Arctique en hiver. Même un énorme réchauffement de 15 à 20 °C ne permettrait pas d'élever les températures hivernales des régions polaires au-dessus de zéro. Mais l'épaisseur de la glace serait beaucoup plus réduite. Cet effet est clairement visible, même à l'heure actuelle.

Les scientifiques soulignent que la superficie et l'épaisseur des glaces de mer offriront de nouvelles opportunités d'exploiter davantage la voie maritime arctique pour le transport de marchandises entre l'Europe et l'Asie, et vice et versa. La voie traversant l'océan Arctique est bien plus courte que les voies classiques passant par le canal de Suez, et peut considérablement réduire les frais de transport.

Les navires ont plus de chances de réussir à naviguer sur la voie maritime arctique en septembre, lorsque la couverture glaciaire est au minimum de son extension. Toutefois, comme l'illustre la Fig. 2.8.2, même lorsque la couverture glaciaire est au minimum de son extension, rien ne garantit que tous les détroits seront praticables. Cela est notamment vrai pour le détroit de Vilkitsky entre la péninsule de Taïmyr et la terre du Nord, qui constitue un obstacle pour l'ensemble de la voie maritime arctique. Ce détroit est resté encombré de glaces, même en 2007. En revanche, il arrive parfois que la couverture glaciaire soit bien plus étendue, mais que les détroits soient praticables. En bref, il est pour le moment bien trop tôt pour parler avec certitude de navigation exempte de glace le long de la côte arctique de la Russie. Selon les modèles climatiques, l'Arctique ne deviendra entièrement dépourvue de glace que durant la saison estivale, aux alentours de 2050.

Figure 2.8.3 **Extension des glaces de l'océan Arctique (minimum annuel) entre 1978 et 2022**



Il convient de rappeler que la fonte des glaces de l'Arctique entraîne la formation d'icebergs, qui peuvent être dangereux pour les navires, ainsi que pour les plateformes pétrolières implantées sur le plateau continental en pleine mer. À l'avenir, les compagnies pétrolières et les sociétés de transport devront garantir une protection proactive contre les icebergs afin d'éviter les collisions et accidents.

Menaces pour les animaux de l'Arctique

La fonte des glaces dans les régions polaires a des conséquences majeures sur les animaux marins, notamment le « roi » de l'Arctique, l'ours polaire. Il n'a pas besoin de la glace en tant que telle, mais ses principales proies sont les phoques, qui se trouvent toujours en bordure des glaces.

En raison du réchauffement climatique, la lisière des glaces se retire vers le nord très rapidement au cours du printemps arctique, si rapidement que les ours polaires n'ont pas le temps de réagir et se retrouvent coupés des phoques par de vastes étendues d'eau exempte de glace (Fig. 2.8.4). Un ours est capable de nager sur plusieurs dizaines de kilomètres, mais pas sur des centaines, et la capacité de nage de ses petits est très limitée. En conséquence, un grand nombre de ces animaux sont bloqués sur la côte. Ils sont affamés et peuvent entrer dans les villages à la recherche de nourriture parmi les ordures, ce qui peut être très dangereux, tant pour les animaux que pour les populations. Il existe certaines façons de parer à ce problème. Premièrement, les populations doivent disposer de moyens d'éloigner les ours, comme des fusils à balles de caoutchouc. Deuxièmement, les villages doivent se débarrasser des déchets alimentaires et les emmener à au moins 1 ou 2 kilomètres du village, de sorte que les ours s'y rendent et ne pénètrent pas dans des zones habitées. Troisièmement, les ours doivent être surveillés par des hommes spécialement formés à cet effet, armés et équipés comme il se doit (leur équipement devant être composé de radios et de téléphones satellites). Cela permettrait de prévenir à la fois les attaques d'ours et le braconnage.

Figure 2.8.4

Cet ours, abandonné à son sort sur la côte, à plus de 100 km du bord de la banquise, est particulièrement mécontent du changement climatique.

Même s'ils doivent renoncer à leur repas favori de phoque, les ours peuvent trouver suffisamment de nourriture sur la côte maritime (oiseaux morts, œufs et petits animaux). Ils peuvent également chasser les morses, bien qu'un ours polaire ne s'attaquera pas à un morse adulte : un animal blessé et affaibli ou un jeune morse sont de meilleures proies. Les ours s'introduiront parfois dans une colonie de morses, causant ainsi une panique au cours de laquelle les morses se presseront les uns contre les autres et les jeunes morses seront écrasés par les mâles plus imposants, ce qui permettra alors aux ours de se nourrir. Ces tactiques fonctionnent particulièrement bien si les morses ont établi leur colonie non pas sur une plage plate, mais sur une pente ou au bord d'une falaise : lorsque les animaux les plus imposants chutent vers le bas, Ils peuvent écraser les jeunes animaux sous eux.

Les morses sont de plus en plus contraints de choisir des lieux inadaptés pour l'établissement de leurs colonies, également en raison de l'absence de glace. Les morses ont non seulement besoin d'îlots de glace sur lesquels se reposer sans perdre leurs forces durant leur migration. Mais ils ont également besoin de glace sur les rives. Auparavant, on dénombrait une grande quantité de glace épaisse le long des côtes, dont une partie formait une croûte sur la plage. Aujourd'hui, il y en a beaucoup moins, et les tempêtes érodent rapidement les sites appropriés pour les colonies de morses ! Les animaux sont donc contraints de choisir d'autres endroits, où ils sont menacés non seulement par les ours, mais également par les hommes.

Il est arrivé que des milliers de morses apparaissent à de nouveaux endroits (Fig. 2.8.5), entre autres à des endroits proches d'aérodromes. Le son d'un avion approchant a causé une panique au cours de laquelle des dizaines de morses ont été tués. Afin d'éviter qu'une telle chose ne se reproduise, le personnel de l'aérodrome fait délibérément du bruit avant l'arrivée des avions, afin que les morses prennent la mer. Néanmoins, ce type de solution requiert une surveillance minutieuse du déplacement des populations de morses, avec le déploiement de personnels et d'équipements.

Figure 2.8.5 **Un nombre record de quelques 35 000 morses regroupés sur le rivage près de Point Lay, Alaska, en septembre 2014. Ils cherchaient un endroit où se reposer après une longue nage dans des eaux exemptes de glace**

Les mers de Barents et de Kara constituent l'habitat du morse de l'Atlantique, lequel est répertorié dans le Livre rouge. On ne dénombre que quelques colonies de ces animaux, dont certaines se situent dans des zones reculées de l'archipel François-Joseph, et d'autres dans des lieux relativement accessibles, le long des voies de transport et dans des endroits prévus pour y installer des plateformes pétrolières et gazières. Il sera essentiel d'effectuer une surveillance étroite et d'identifier les problèmes de manière anticipée, afin d'éviter la disparition des morses dans cette partie de l'Arctique.

La survie des phoques de la mer Blanche pose un autre problème. Contrairement aux ours et aux morses, les phoques ne peuvent vivre le long des côtes où ils constitueraient une proie facile pour les loups, les chiens et autres prédateurs. Pendant longtemps, le phoque a été chassé par les populations de la côte arctique, et la fourrure blanche des jeunes phoques était particulièrement prisée. La chasse en est aujourd'hui interdite. De nombreux phoques périssent également en raison du passage des navires dans les zones où ils sont implantés. Les capitaines de navire ont désormais l'instruction d'éviter les endroits où les phoques se rassemblent.

Les phoques de la mer Blanche étaient auparavant chassés pour la fourrure des bébés phoques. Les voies de navigation qui passent par les endroits où ces animaux se rassemblent ont également posé problème. Aujourd'hui, les phoques sont confrontés à un autre problème : la diminution de la couverture glaciaire de la mer Blanche due au réchauffement climatique ne leur permet pas d'assurer la survie de leurs bébés.

Les phoques sont confrontés à un autre problème en raison du réchauffement climatique : la fourrure des bébés phoques est très chaude, mais pas étanche. Par conséquent, toute chute dans l'eau ou même dans des flaques formées par la fonte des glaces peut leur être fatale : ils gèlent, tombent malades et souvent meurent. Plus tard, si les quantités de glace venaient à se réduire davantage, il pourrait s'avérer nécessaire de trouver une île protégée permettant aux bébés phoques de grandir en toute sécurité.

Le renne est également touché par le changement climatique. Du fait de la mauvaise qualité de la couverture glaciaire des rivières, les éleveurs ont davantage de difficultés à guider leurs troupeaux vers des endroits appropriés au début de l'hiver. Le renne peut traverser une rivière à la nage, ou marcher sur une glace robuste. Mais il ne peut traverser une rivière couverte d'une fragile couche de glace. La disparition de la glace formée sur les rivières plus tôt dans l'année et la fonte de la toundra créent des obstacles à la migration des rennes et entraînent souvent le décès de nombreuses bêtes.

Nous ne pouvons facilement et rapidement mettre fin au changement climatique, il est donc essentiel de parer à ces problèmes en supprimant les autres obstacles créés par l'homme. Par exemple, en s'assurant que les conduites de gaz n'interfèrent pas avec la migration des rennes. Pour le moment, les conduites présentes dans les régions du pergélisol sont placées au-dessus du sol sur des supports spéciaux, ce qui empêche le renne de passer dessous ou de sauter au-dessus. La construction de sections aériennes spéciales est nécessaire pour permettre aux animaux de passer sous les conduites

Fonte du pergélisol

La région du pergélisol arctique est peuplée depuis plusieurs milliers d'années, toutefois ces peuples autochtones (Chukchi, Nenets, Yakuts, Evenks, Aleut, Yupik et Inuit) n'ont pas construit de maisons et leur mode de vie n'a pas endommagé le sol gelé de la région du pergélisol arctique. Lorsque les Russes sont arrivés pour la première en Arctique et ont découvert que le sol gelait sur une profondeur de plusieurs mètres et que seule la couche supérieure fondait en été, ils ont été particulièrement surpris. Les chefs des colons écrivirent que la terre était gelée, de sorte qu'il était impossible d'y cultiver du blé.

Figure 2.8.6 Fonte du pergélisol, Svalbard Norvège

La nature du pergélisol n'a été comprise qu'à la fin du XIX^{e} siècle, lorsqu'il a été constaté que le pergélisol allait jusqu'à 1 500 m de profondeur à certains endroits. Néanmoins, la couche gelée exposée à des températures comprises entre -2 et -7 °C affichait généralement une épaisseur de 100 m.

Dans les endroits exempts de pergélisol, la température du sous-sol est toujours de quelques degrés au-dessus de zéro, de sorte que des canalisations d'eau peuvent être installée en toute sécurité et l'eau des ruisseaux et rivières être acheminée à l'aide de canalisations et de tunnels au profit des villes. La couche supérieure du sol dégèle en été, cependant les couches gelées restent en place à une profondeur allant de 10 cm au nord à 1 m au sud du pergélisol.

Figure 2.8.7

Une section verticale du pergélisol avec des couches de glace

La construction est particulièrement difficile sur le terrain du pergélisol en raison de problèmes avec les fondations. Le sol gelé ne peut être creusé, mais doit être péniblement cassé ou dégelé. Il est possible de percer, découper et même faire exploser le pergélisol, mais cela coûte cher et nécessite un équipement spécifique. Le pergélisol contient de grandes quantités de glace, parfois même des couches entières (Fig. 2.8.7).

Par conséquent, lorsque le dessus du pergélisol fond en été, il forme une légère couche « semi-liquide » incapable de supporter des bâtiments, des appuis de pont ou des lignes électriques. De telles constructions doivent reposer sur des piliers enfoncés profondément dans le sol, à des niveaux où la glace ne fond jamais.

Le dégel parfaitement inégal qui intervient en été pose également d'autres problèmes. Le relief n'est pas plat, et la nature du sol peut varier uniquement en se déplaçant de quelques mètres vers la gauche ou la droite. Il peut arriver qu'une quantité d'eau plus importante s'accumule à certains endroits durant la saison chaude et soit bloquée dans le sous-sol en raison du pergélisol. L'hiver venu, l'eau ainsi piégée gèle et se transforme en inclusions (lentilles) et couches de glace. La glace prend plus d'espace que l'eau, par conséquent le sol gonfle. Des bosses et des irrégularités se forment, lesquelles sont susceptibles de détruire des bâtiments et des routes (Figures : 2.8.8 et 2.8.9).

Figure 2.8.8

Une section ferroviaire endommagée par les effets du pergélisol

Figure 2.8.9

Un bâtiment détruit par un gonflement et un affaissement inégal au-dessus du pergélisol

À mesure que le climat change et que les températures augmentent, le pergélisol se dégèle à des niveaux de plus en plus profonds en été. La profondeur d'ancrage des piliers précédemment construits pourrait ne pas suffire et ceux-ci pourraient commencer à « flotter », entraînant la déformation et l'effondrement des bâtiments.

Les problèmes ne s'arrêtent pas là. Lorsque le réchauffement climatique progresse, une année particulièrement chaude peut entraîner le dégel du pergélisol sur une plus grande profondeur que d'ordinaire, et l'eau piégée s'échapper. Cela laisse des espaces vides dans le sous-sol, le terrain s'affaisse et les appuis de pont, les lignes électriques ou même les petites constructions peuvent s'effondrer. Cet effet s'appelle le thermokarst. Il est extrêmement dangereux et son ampleur du fait du réchauffement climatique n'était pas prévisible à l'époque où les bâtiments ont été conçus et construits dans l'Arctique (Figures 2.8.10 et 2.8.11).

Les fuites d'eau s'infiltrant dans le sol du fait de l'action humaine ajoutent aux risques. L'affaiblissement supplémentaire du pergélisol dû au réchauffement climatique pourrait entraîner de graves problèmes de thermokarst associés à la fuite des canalisations d'eau et conduites d'évacuation, qui étaient moins dangereuses lorsque le pergélisol était solidement établi. La règle à suivre est la suivante : ôter la neige des toits et des espaces adjacents à un bâtiment avant qu'elle ne fonde, car l'eau ne doit pas s'infiltrer sous le bâtiment.

Quelles sont les mesures à prendre ? Nous ne pouvons arrêter rapidement le changement climatique, et ses effets nuisibles augmentent rapidement. D'importantes sommes devront être investies dans la congélation directe du sol et dans la conception de bâtiments plus onéreux, capables de résister aux nouvelles conditions.

Figure 2.8.10

Un immeuble qui s'est effondré dans le village de Chervis (Russie)

Figure 2.8.11

Un angle d'immeuble qui s'est effondré à Yakutsk (Russie)

Le maintien du pergélisol en Arctique peut être assuré par des dispositifs relativement simples. Parfois, des conduits de ventilation souterrains suffisent : l'air très froid de la surface gèle le sol à des températures si basses qu'il n'a pas le temps de fondre durant l'été. Cette méthode convient particulièrement pour les routes, qui sont sur des remblais surélevés. Le sol du remblai peut être maintenu gelé grâce à la pose de canalisations d'environ 20 cm de diamètre, espacées de 50 cm, de part et d'autre du remblai.

Le sol peut également être congelé à l'aide de dispositifs appelés thermosiphons – tubes verticaux, hermétiquement fermés des deux côtés, enfoncés d'un côté dans le sol et dépassant de l'autre de 2 ou 3 m au-dessus du sol (Fig. 2.8.13). Le tube est partiellement rempli d'un liquide de refroidissement (réfrigérant), tel que l'ammoniaque ou le dioxyde de carbone liquide. Le thermosiphon congèle le sol en hiver en raison de la différence de température entre le sol relativement chaud (quelques degrés en-dessous de zéro) et l'air, qui est 20 à 40 °C plus froid. Le liquide réfrigérant au fond du tuyau s'évapore du fait de la température plus élevée du sol, entraînant le refroidissement du sol. La vapeur réfrigérante s'élève ensuite vers le haut et se condense dans l'atmosphère froide au-dessus du sol, à la suite de quoi elle reflue vers le bas et le processus se répète.

Le thermosiphon achemine donc le froid dans le sous-sol, abaissant ainsi la température du sol de quelques degrés supplémentaires par rapport à ce qui se serait autrement produit, cela suffit à s'assurer que le sol ne fondra pas en été. Le thermosiphon ne fonctionne pas en été, car l'air est plus chaud que le sol et le réfrigérant à l'intérieur du conduit ne circule pas. En été, le conduit métallique achemine la chaleur dans le sol, mais l'effet est moindre que celui obtenu en hiver. Cela est un moyen de congeler le sol situé sous les routes et les supports de tuyauteries, et même sous les grands édifices. Cependant, les thermosiphons ne doivent pas être installés à plus de 1 m de distance les uns des autres (Fig. 2.8.13).

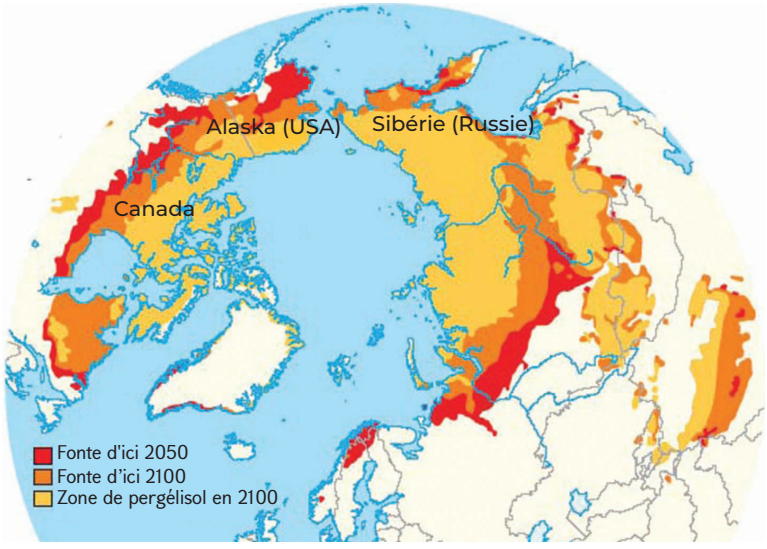


Figure 2.8.12

Dégel futur du pergélisol au travers de l'Arctique. Les zones en rouge correspondent aux régions touchées par le dégel d'ici 2050, les régions en orange à celles touchées d'ici 2100, et les régions en jaune à celles encore gelées en 2100

Il serait erroné de croire que les thermosiphons offrent une solution simple au problème de la fonte du pergélisol. Ils doivent être régulièrement remplacés, et malgré leur simplicité, ils sont onéreux. Selon les estimations, une congélation permanente du sol situé sous les supports de gazoducs en Russie exigerait un investissement de 10 milliards de dollars américains !

Par ailleurs, les thermosiphons ne constituent qu'une mesure provisoire, car ils ne peuvent abaisser la température que de quelques degrés et seront sans effet en cas de réchauffement plus intense. Les routes devront être installées sur des supports spéciaux enfoncés profondément dans le sol, essentiellement, afin de créer une voie surélevée sur piliers, ce qui augmentera considérablement les coûts de construction (Fig. 2.8.14).

Figure 2.8.13

Route équipée de thermosiphons refroidissant le sol

Figure 2.8.14

Route reposant sur des supports enfoncés profondément dans le sol

Il n'est pas toujours possible de s'assurer que le sol reste gelé, et les technologies de congélation sont impuissantes face aux tempêtes et à l'importante érosion côtière. Il arrive de plus en plus souvent qu'il soit impossible de sauver les édifices et les infrastructures, la seule solution consistant à déplacer les populations.

Autre point important, de grandes quantités de gaz à effet de serre sont rejetées par le sol de la toundra lors du processus de fonte du pergélisol, ce qui augmente l'effet de serre et accélère le réchauffement climatique

Anomalies climatiques dans l'Arctique

Comme vous le savez déjà, le vent et la température sont deux facteurs à prendre en compte lors de l'évaluation des conditions météorologiques. Un froid extrême sans vent vaut bien mieux qu'un puissant blizzard empêchant quasiment toute activité extérieure, notamment le déplacement d'un lieu à un autre. Travailler dans le blizzard est particulièrement dangereux et difficile. Les vents forts sont de plus en plus courants dans l'Arctique, ce qui requiert l'utilisation de quantités croissantes d'équipements spéciaux, de vêtements, d'équipements de sécurité et de provisions pour faire face aux tempêtes de neige prolongées.

Les niveaux d'humidité dans l'Arctique ont augmenté, ce qui a souvent entraîné une alternance de périodes de gelée et de dégel. Par conséquent, les routes, les ponts et les lignes électriques sont souvent recouverts d'une couche de glace, ce qui donne lieu à des pannes et des accidents plus fréquents. Les édifices et structures se détériorent plus rapidement en raison de l'action de l'eau et de la glace sur les micro fissures. L'eau peut s'infiltrer dans la moindre petite fissure, puis se transforme en glace et gonfle, ce qui contribue à agrandir la fissure. La glace fond, davantage d'eau s'infiltre, qui gèle à son tour, ce qui agrandit d'autant plus la fissure. Plus ce cycle se répète, plus l'édifice se déNiveau rapidement.

Les basses régions, comme la péninsule de Yamal, sont de plus en plus affectées par les puissantes inondations printanières, durant lesquelles de vastes territoires sont inondés d'eau sur une profondeur d'un mètre ou plus. La péninsule de Yamal connaît aujourd'hui davantage de chutes de neige, toutefois les grandes quantités de neige qui en résultent fondent désormais plus vite au printemps. Yamal est également confrontée à un autre problème, à savoir l'infiltration d'eau salée dans les eaux souterraines, ce qui entraîne la rapide érosion des sections souterraines de tous types d'édifices.

Quels sont les effets du changement climatique sur les peuples autochtones du Nord ?

Les populations autochtones de l'Arctique souffrent du changement climatique, car leur mode de vie et leurs moyens de subsistance traditionnels dépendent directement des conditions climatiques. La chasse, la pêche, la récolte de produits naturels et l'élevage de rennes offrent à ces populations de quoi se nourrir, elles constituent leur principale source de revenus et sont très importantes pour la préservation des traditions et de la culture de ces peuples et des territoires où ils vivent.

Figure 2.8.15 Mode de vie des peuples autochtones de l'Arctique

L'élevage de rennes représente une part importante des moyens de subsistance et du mode de vies des peuples autochtones du Grand Nord. Les dégels plus fréquents dus au changement climatique impliquent que le sol est souvent recouvert d'une couche de glace, les rennes ayant alors davantage de difficultés à trouver et consommer du lichen. La fonte du pergélisol, les changements des conditions d'enneigement, ainsi qu'une fonte plus précoce et un gel plus tardif de la glace des rivières bouleversent les itinéraires de migration des rennes entre les pâturages d'hiver et d'été. Les changements apportés aux itinéraires de migration des rennes et la diminution des populations d'animaux marins, dont la chasse fait partie intégrante du mode de vie des peuples du Grand Nord, contraignent les populations à chercher de nouvelles sources d'alimentation et de revenus.

Comment aider les peuples autochtones de l'Arctique à s'adapter au changement climatique ?

1. Mener des campagnes d'information au sein de la population locale au sujet du changement climatique et de ses conséquences éventuelles, afin qu'elle puisse se préparer à combattre ces problèmes.

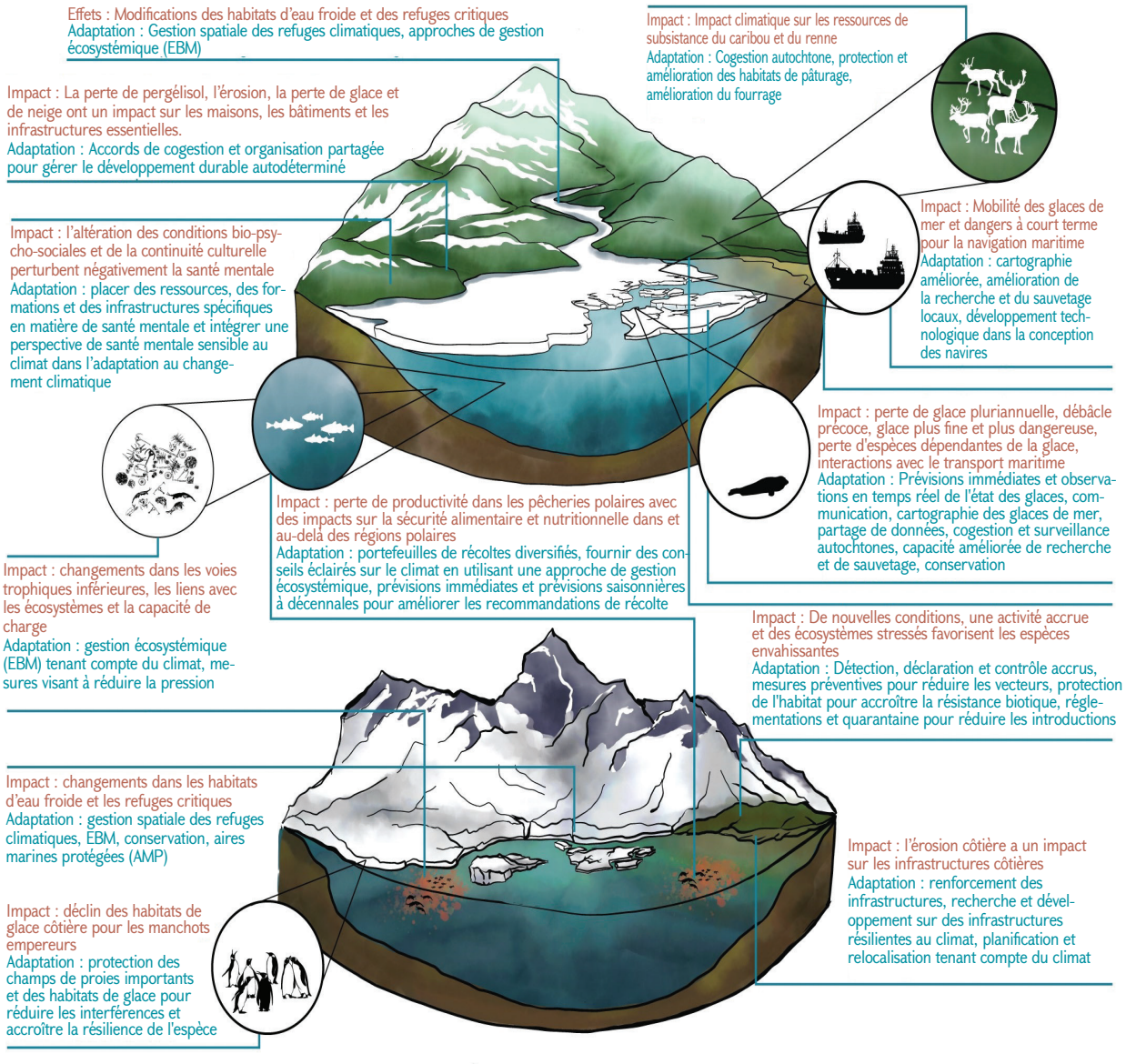
2. Développer l'écotourisme dans ces régions.

3. Offrir un meilleur accès aux soins dans le Grand Nord, notamment dans les régions et villages reculés, et assurer un approvisionnement fiable en électricité et en chaleur.

Comment les impacts du changement climatique et le potentiel d'adaptation dans l'Arctique se comparent-ils à ceux de l'Antarctique ?

Nous connaissons déjà l'amplification polaire, qui signifie que les pôles de la Terre se réchauffent plus rapidement que la moyenne mondiale. Nous savons également déjà que l'Arctique s'est réchauffé près de quatre fois plus vite que la moyenne mondiale au cours des quatre dernières décennies et que l'Antarctique se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne mondiale. Les scientifiques ont comparé les impacts du changement climatique et les options d'adaptation dans l'Arctique et l'Antarctique, qui montrent certaines similitudes et différences, par exemple en raison de différents habitats (Figure 2.8.16).

Figure 2.8.16 Impacts du changement climatique et potentiel d'adaptation dans l'Arctique et l'Antarctique



Qu'en est-il des effets positifs du réchauffement du climat ?

Il est vrai que le changement climatique dans l'Arctique offre certaines opportunités. Les dépenses en matière de chauffage sont moins importantes et la diminution de la couverture glaciaire permet d'utiliser l'océan Arctique comme route maritime entre l'Europe, le Japon et la Chine, et inversement. La mise en place d'infrastructures de trafic maritime est nécessaire le long de la route maritime arctique, notamment des balises, des équipements de secours, et des ports où les navires pourront demeurer en cas de tempête ou trouver refuge en cas d'apparition soudaine de glace.

Mais, le climat de plus en instable de l'Arctique et le réchauffement mondial donneront lieu à des blizzards plus fréquents et à de brusques variations de température.

La période de chauffage pourra être raccourcie, toutefois les conditions météorologiques imprévisibles nous imposent d'apprendre à régler le chauffage en fonction de la température extérieure réelle et non en fonction de la date indiquée sur le calendrier. Cela implique l'installation de régulateurs sur les radiateurs, afin que les résidents puissent régler la température de leurs logements selon les besoins. Les services russes en charge du logement ne sont pas prêts pour cela, cela demandera donc des ouvrages et équipements supplémentaires.

Le changement climatique aura plus d'incidences négatives que positives sur l'ensemble des régions de l'Arctique.
Selon les climatologues et les économistes, l'adaptation à la fonte du pergélisol, à l'érosion côtière et à toutes les éventuelles incidences négatives du changement climatique est possible, mais très onéreuse. Il est donc très important de trouver un ou plusieurs moyens d'atténuer le réchauffement climatique.

QUESTIONS

1. Où le réchauffement climatique évolue-t-il le plus rapidement : dans le monde entier ou dans l'Arctique ?

2. Pourquoi la température de l'air augmente-t-elle rapidement lorsque les champs de glace de l'Arctique se morcèlent au printemps afin de laisser place à des eaux libres ?

3. Pourquoi les ours polaires sont-ils affectés par le rétrécissement de la banquise ? Ont-ils besoin de glace ?

4. Quel est le danger qui menace actuellement les phoques de la mer Blanche ?

5. Pourquoi la fonte du pergélisol est-elle dangereuse pour les édifices ? Que recommanderiez-vous pour que les bâtiments et autres infrastructures s'adaptent à la fonte du pergélisol ?

6. De quelle manière le changement climatique affecte-t-il la vie des peuples autochtones de l'Arctique ? Que faire pour les aider à s'adapter au changement climatique ?

EXERCICES

1

Expérience

But de l'expérience : Observer comment le volume d'eau évolue lorsque l'eau gèle.

Matériel : Bouteilles en verre étanches, eau.

Comment procéder : Remplissez la bouteille en verre d'eau, fermez-la et mettez-la au congélateur. Qu'est-il arrivé à la bouteille lorsque l'eau a gelé ? Pour quelle raison ? Faites un parallèle avec les processus générés par le pergélisol.

2

Expérience

But de l'expérience : Observer les changements apportés aux propriétés physiques des matériaux lorsqu'ils gèlent et dégèlent.

Matériel : Une boîte en plastique ou en carton contenant de la crème aigre. Observez. Un sol ayant gelé, puis dégelé, ne sera pas le même qu'avant de geler. Des couches de glace pourront s'y développer, lesquelles se répartiront entre eau et sol au moment du dégel. La crème aigre fonctionne selon le même principe lorsqu'elle est congelée puis décongelée.

Comment procéder : Prenez un pot de crème aigre en carton ou en plastique. Mettez-le au congélateur. Lorsque la crème gèlera, elle ne formera pas un unique bloc : des couches de glace apparaîtront. Au moment de sa décongélation, la crème se divisera en un liquide blanc et une substance blanche plus épaisse (une fois mélangée, cette mixture retrouvera son apparence de crème aigre et sera parfaitement mangeable).

2.9 Les effets du changement climatique sur **les villes et la santé**

La moitié de la population mondiale vit en ville

Depuis des temps immémoriaux, les populations de chaque pays et chaque région géographique du monde se sont divisées entre citadins, d'une part, et paysans, d'autre part. Historiquement, les villes offrent de meilleures conditions professionnelles, les premières usines y ont par exemple été construites, et constituent un lieu de vie plus sûr, car protégées par des murs. Les populations vivant hors des villes se sont concentrées sur l'agriculture : la culture ou l'élevage.

Depuis la fin du XIX^{e} siècle, on constate un afflux majeur de population vers les villes. Ce processus s'appelle l'urbanisation.

Figure 2.9.1 La vieille ville de Berne en 1820

L'URBANISATION
est le processus par lequel les villes acquièrent une position dominante dans une société. Elle est le fruit de la croissance de l'industrie dans les villes, du développement de leurs fonctions culturelles et politiques et de l'approfondissement de la répartition territoriale du travail.

En 2008, en conséquence de l'urbanisation, la part de population mondiale vivant dans les villes a, pour la première fois, dépassé 50 % et a continué à croître par la suite (Fig. 2.9.2). À la mi-2023, environ 4,6 milliards des plus de huit milliards d'habitants de la planète vivaient dans des villes. Cela représente 57 % de la population mondiale. Selon les Nations Unies, la population urbaine devrait augmenter de près de 600 millions d'ici 2030, pour atteindre un total de 5,2 milliards (environ 60 % de la population mondiale).

Il existe actuellement 34 villes dans le monde comptant plus de 10 millions d'habitants. La plupart de ces mégalopoles sont situées en Asie (21), en Amérique latine (6) et en Afrique (3). La plus grande ville est l'agglomération urbaine de Tokyo, avec une population de plus de 38 millions d'habitants (tableau 2.9.1). Viennent ensuite Delhi (26,5 millions) et Shanghai (24,5 millions). Selon les calculs des Nations Unies, le nombre de mégapoles devrait atteindre 43 d'ici 2030. Delhi sera alors la plus grande ville du monde, avec une population de près de 39 millions d'habitants.

L'étude du climat des villes importe donc à plus de la moitié au moins de la population de la planète.

Figure 2.9.2 **Part de la population urbaine par rapport à l'ensemble de la population dans les plus grandes villes du monde en 2018**

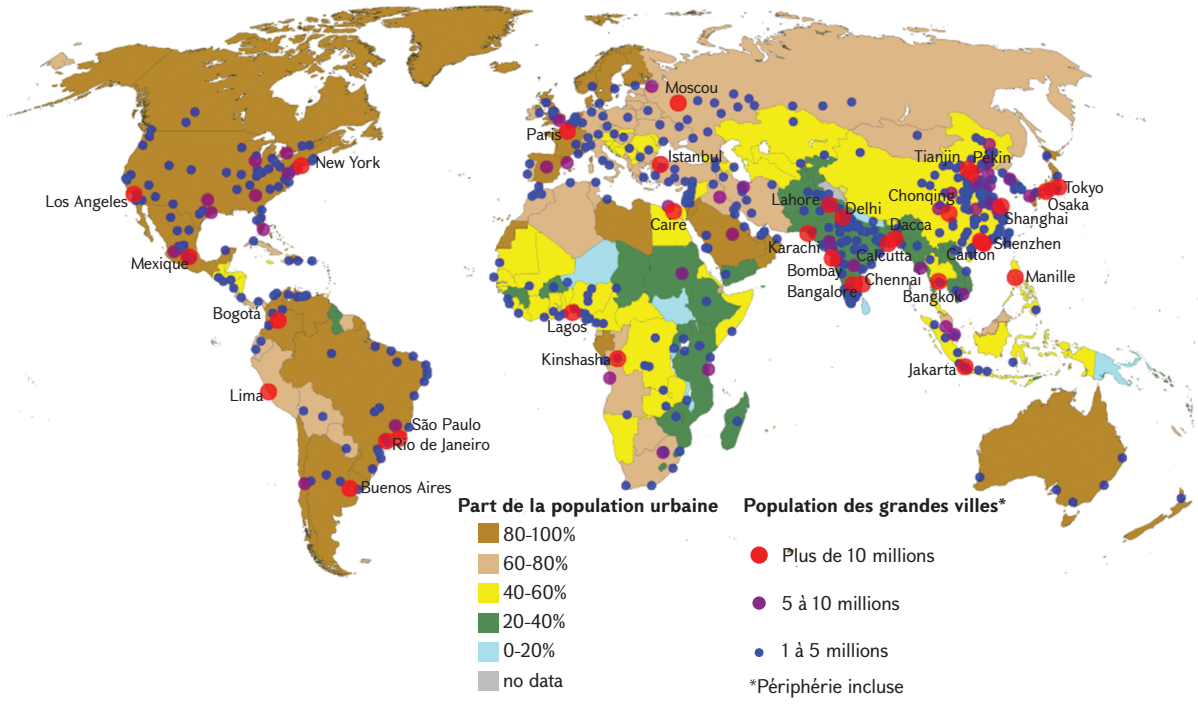


Table 2.9.1 Villes de plus de 10 millions d'habitants

№	Ville	Pays	Population (en millions de personnes)
1	Tokyo	Japan	38.1
2	Delhi	Inde	26.5
3	Shanghai	Chine	24.5
4	Mumbai	Inde	21.4
5	São Paulo	Brésil	21.3
6	Pékin	Chine	21.2
7	Mexico City	Mexique	21.2
8	Osaka	Japan	20.3
9	Le Caire	Égypte	19.1
10	New York	USA	18.6
11	Dhaka	Bangladesh	18.2
12	Karachi	Pakistan	17.1
13	Buenos Aires	Argentine	15.3
14	Calcutta	Inde	15.0
15	Istanbul	Turquie	14.4

Figure 2.9.3 Tokyo et ses 38 millions d'habitants est la plus grande ville du monde en termes de population

Pourquoi les villes sont-elles qualifiées d'îlots de chaleur ?

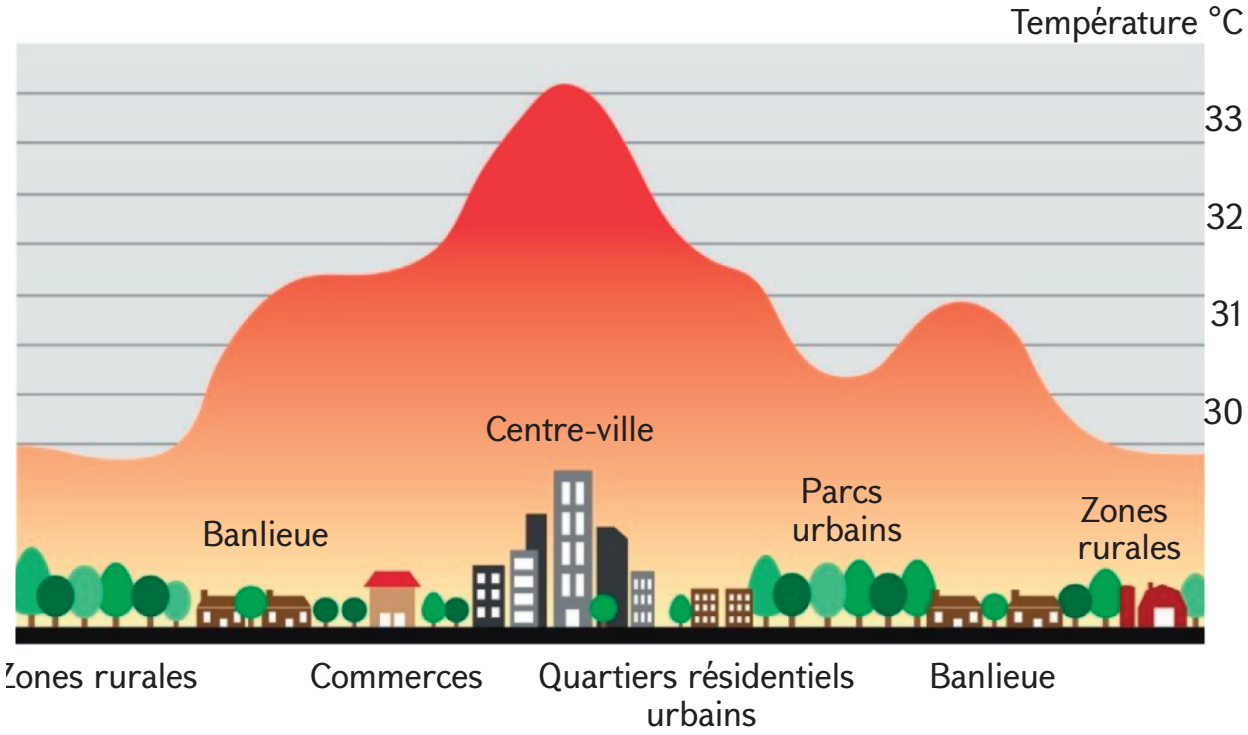
Les points chauds écologiques uniques que constituent les villes sur la planète, doivent être interprétés littéralement, en effet, les émissions des différentes substances émanant des usines et des véhicules « stagnent » dans la couche inférieure de l'atmosphère au-dessus des villes, créant ainsi un effet de serre, ce qui entraîne l'augmentation de la température de l'air de la ville de plusieurs degrés par rapport à sa périphérie. Par conséquent, les scientifiques qualifient les villes d'îlots de chaleur.

UN ILOT DE CHALEUR
Sostituire con ÎLOT est une zone située dans le centre d'une grande ville, où la température de l'air est supérieure à celles des zones périphériques. L'effet d'îlot de chaleur urbain se fait surtout sentir en soirée et au cours de la nuit, notamment au printemps et à l'automne, lorsque la différence de température entre le centre de la ville et les zones périphériques peut être de 10 à 15 °C.

L'effet d'îlot de chaleur dans les grands centres urbains est intensifié par le processus de réchauffement climatique.

Nous avons tous personnellement fait l'expérience de l'effet d'îlot de chaleur urbain : lorsque l'on sort d'un immeuble urbain lors d'une chaude soirée d'été, la température dans la rue est suffisamment chaude pour se promener avec des vêtements légers, mais à l'extérieur de la ville, la soirée est suffisamment fraîche pour supporter une veste, même durant le mois le plus chaud. Cela est dû au fait que dans un environnement urbain, l'air se refroidit plus lentement : il reste chaud grâce aux murs et aux toits des édifices qui se sont imprégnés de chaleur au cours de la journée.

Figure 2.9.4 Répartition de la température de l'air au-dessus d'une ville (îlot de chaleur urbain)



Premières études du climat urbain

Les premières études du climat urbain ont été menées par l'anglais Luke Howard (1772-1864), un météorologue amateur à Londres fasciné depuis toujours par les nuages et la météo.

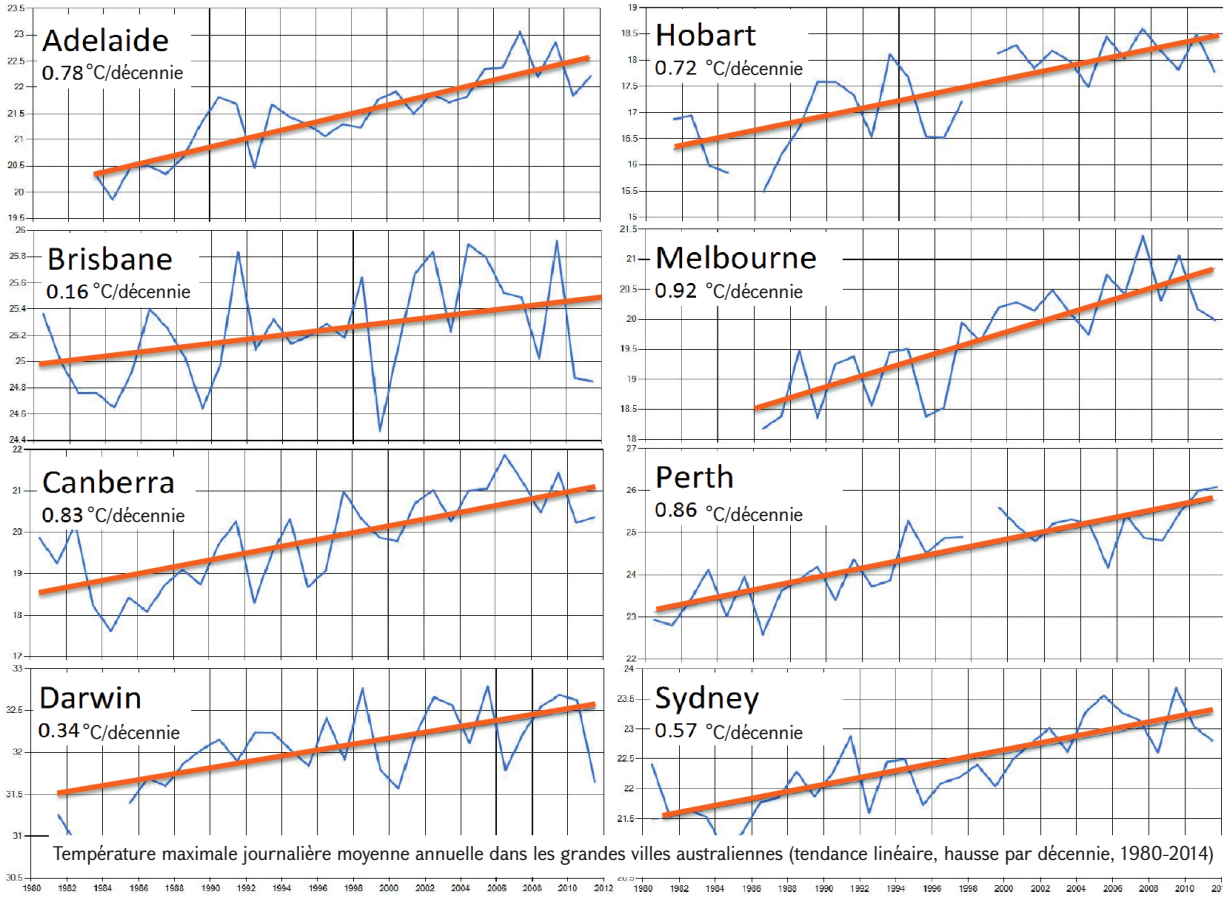
De 1806 à 1831, Howard a effectué des mesures quotidiennes de la pression atmosphérique, de la température de l'air et de l'humidité, des précipitations et de l'évaporation dans la banlieue de Londres. Pour ses observations, il s'est appuyé sur les articles de journaux faisant mention d'événements météorologiques précis. Howard n'avait pas l'intention d'étudier précisément le climat londonien, mais souhaitait réaliser des études générales sur le climat, en se servant de Londres comme point de référence pour ses observations. Néanmoins, le point crucial de ses études et ce qui lui a valu la qualité de fondateur de la climatologie urbaine a été sa démarche de comparer les données de ses propres mesures météorologiques avec celles réalisées par la Royal Society sur un site situé au cœur de Londres. La comparaison a révélé ce que les chercheurs modernes appellent l'effet « d'îlot de chaleur urbain ».

Quels sont les effets du changement climatique sur les habitants des villes ?

Le changement climatique a des effets substantiels sur la santé et la vie humaine. Nous savons déjà que notre santé dépend de facteurs comme le mode de vie, la sécurité alimentaire, l'hérédité, la profession exercée, l'environnement et l'accès aux soins, mais il apparaît aujourd'hui qu'elle dépend également du changement climatique.

Le changement climatique est particulièrement perceptible en ville, et notamment dans les grandes villes. À titre d'exemple, l'augmentation de la température de l'air à Moscou au cours du dernier siècle a été de plus de 2 °C, tandis que la hausse de la température moyenne mondiale n'a été que de 1 °C. La température de l'air augmente également rapidement dans d'autres grandes villes du monde (Fig. 2.9.5).

Figure 2.9.5 **Modification de la température maximale journalière moyenne annuelle dans les grandes villes australiennes entre 1980 et 2014. Tendance linéaire, hausse exprimée par décennie**



Température maximale journalière moyenne annuelle dans les grandes villes australiennes (tendance linéaire, hausse par décennie, 1980-2014)

Les experts de l'Organisation mondiale de la santé estiment que le réchauffement climatique génèrera des périodes d'extrême chaleur de plus en plus fréquentes, intenses et longues. On sait que les variations de pression, de température et d'humidité peuvent rendre les conditions de vie particulièrement inconfortables dans les villes, et que davantage de cas de décès chez les personnes âgées, jeunes enfants et les personnes malades y sont recensés en période de forte chaleur. La chaleur extrême s'accompagne de concentrations plus élevées de pollen et autres particules susceptibles de causer des allergies et de l'asthme.

Les personnes vivant et travaillant en centre-ville, et les personnes dont le travail nécessite de passer beaucoup de temps en extérieur (employés des travaux publics, ouvriers du bâtiment, etc.) sont particulièrement exposés par temps chaud.

Si une vague de chaleur dure plus d'une semaine, elle peut entraîner des problèmes cardiaques, voire la mort, chez les personnes âgées et les personnes en mauvaise santé.

Selon une étude publiée dans la revue Nature Medicine, près de 62 000 personnes sont mortes de causes liées à la chaleur en Europe au cours de l'été 2022. L'étude a analysé les données de température et de mortalité entre 2015 et 2022 pour 35 pays européens, représentant une population totale de 543 millions, et les a utilisées pour créer des modèles épidémiologiques permettant de calculer les décès liés à la chaleur. Les chercheurs ont découvert que l'Italie était le pays le plus durement touché, avec environ 18 000 décès, suivie de l'Espagne avec plus de 11 000 et de l'Allemagne avec environ 8 000. La chaleur extrême a touché de manière disproportionnée les personnes âgées et les femmes. Sur les près de 62 000 décès analysés, le taux de mortalité lié à la chaleur était 63 % plus élevé chez les femmes que chez les hommes. L'âge est également un facteur important, le nombre de décès augmentant considérablement chez les personnes âgées de 65 ans et plus.

La prévision d'une vague de chaleur en temps opportun est extrêmement importante, car elle donne la possibilité au personnel médical de s'y préparer. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) recommande de transmettre une alerte au moins deux jours avant le début de la période d'extrême chaleur.

Les USA, le Canada, la France et certains autres pays ont déjà pris certaines mesures pour faire face aux problèmes liés à l'effet d'îlot de chaleur dans le contexte du réchauffement climatique. À titre d'exemple, la ville américaine de Philadelphie préconise un système de « bons offices » durant les canicules : les médias rendent régulièrement compte de l'évolution des conditions météorologiques et dispensent des conseils sur la façon d'éviter les maladies liées à la chaleur. Le numéro d'une ligne d'assistance téléphonique est publié dans les journaux et est également affiché sur un grand écran à forte visibilité en centre-ville. Les services médicaux d'urgence et les services d'incendie prévoient du personnel supplémentaire. Des locaux climatisés dédiés sont mis à la disposition des personnes âgées, qui y sont amenées par un service de transport spécial et gratuit afin de moins souffrir de la chaleur.

Les températures que les populations de régions climatiques plus chaudes considèrent comme normales peuvent être qualifiées de vague de chaleur dans les régions plus fraîches si elles sortent des tendances climatiques habituelles. Aux États-Unis par exemple, la définition d'une vague de chaleur varie selon la région. Dans les états du nord-est, celle-ci est généralement définie comme une période de trois jours consécutifs durant lesquels les températures atteignent ou dépassent 90 °F (+32,2 °C). En Californie, où le climat est plus chaud, la vague de chaleur est associée à un seuil plus élevé de 100 °F (+37,8 °C) pendant trois jours consécutifs ou plus. Le National Weather Service émet des alertes canicules lorsque des périodes inhabituelles de forte chaleur sont attendues.

Précautions à prendre en période de chaleur

- Porter des vêtements en fibres naturelles : ils aident à éviter les coups de chaleur en permettant à la peau de respirer.
- Conserver une bouteille d'eau sur soi, de préférence d'eau pas trop froide. Il faut boire au moins 3 litres d'eau par jour en période de chaleur.
- Ne pas s'exposer directement au soleil. Le soleil est à son plus fort de 12 h à 16h, il est donc recommandé de rester à l'intérieur durant ces heures.
- Toujours porter un chapeau ou un couvre-chef.
- Ne pas acheter de denrées périssables : les bactéries se multiplient très rapidement lorsque les températures sont élevées, il y a donc risque d'intoxication alimentaire grave.
- Manger beaucoup de fruits, de légumes, de salades diverses et de soupes froides.
- Éviter les aliments gras et salés.
- Ne pas faire trop de sport et d'entraînement physique.
- Rester calme : le stress augmente le risque de coup de chaleur, d'insolation et d'accidents cardiovasculaires.
- Ne pas s'asseoir directement sous l'air conditionné : la différence de température entre la chaleur de la rue et une pièce climatisée est très importante, et de telles variations de température peuvent provoquer des rhumes et des pneumonies.

Le changement climatique a une incidence négative sur la santé (Fig. 2.9.6). Les maladies infectieuses dangereuses, comme l'encéphalite et la malaria, se développent dans des régions où elles n'étaient pas présentes auparavant, et la période de l'année où il existe un risque d'infection est plus longue.

Le changement climatique augmente les risques d'infection

L'encéphalite à tiques est une infection virale. Le virus pénètre dans l'organisme humain par la morsure d'une tique infectée. Les tiques encéphalitiques, principales porteuses du virus, vivent dans la taïga et dans les régions forestières de Sibérie, de l'Oural et de l'Extrême-Orient russe. Néanmoins, récemment, un nombre croissant de cas d'infection ont été recensés dans les régions centrale de la Russie européenne, dans le nord-ouest du pays et dans la région de la Volga. Des cas d'encéphalite à tiques ont été recensés pour la première fois dans des parties de la Russie européenne, et les scientifiques attribuent cela au réchauffement climatique.

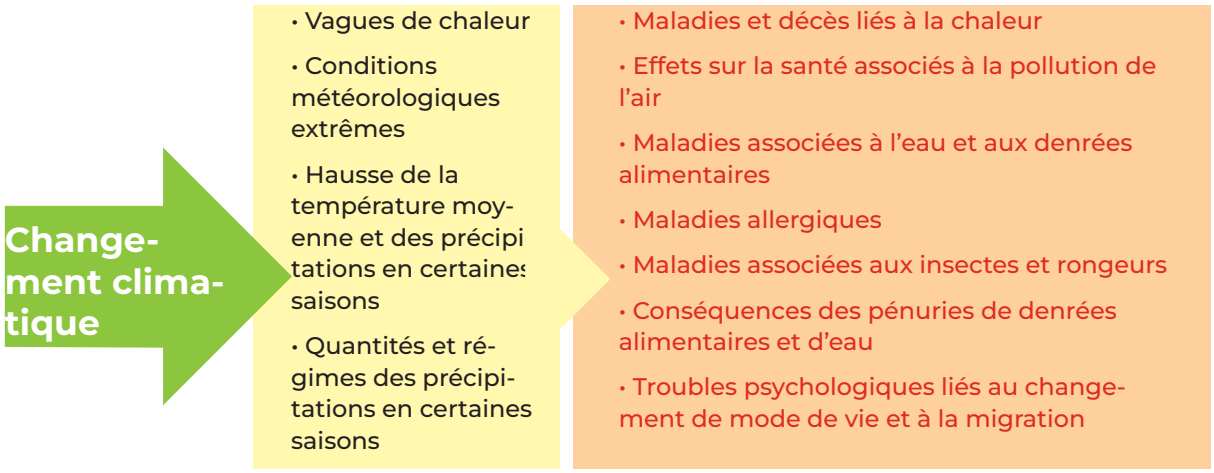
Le temps plus clément en hiver et au printemps favorise la propagation des tiques : elles ont davantage de chances de survivre à l'hiver et peuvent ainsi se multiplier rapidement au printemps. En règle générale, seule une petite proportion des tiques sont infectées par l'encéphalite. Toutefois, la hausse du nombre total de tiques implique une hausse du nombre d'individus infectés.

La Malaria (de l'italien « mala aria », signifiant « mauvais air »), appelée également « fièvre des marais », est une maladie infectieuse transmise à l'homme par des piqûres de moustiques infectés, entraînant de fortes fièvres. La propagation de la malaria dépend de la présence de moustiques porteurs de malaria dans une région donnée et des températures ambiantes auxquelles l'agent viral qui cause la maladie peut se développer chez les moustiques.

La malaria sévit généralement dans les pays tropicaux, mais la maladie est beaucoup moins présente sur les hauts plateaux tropicaux, où les températures plus froides freinent le moustique et le développement du parasite en son sein.

Avec le réchauffement climatique, la frontière de la région où sévit la malaria se déplace vers des zones bénéficiant d'un climat plus clément, loin de l'équateur et en amont, et la « saison de la malaria » (période de l'année où les épidémies surviennent le plus souvent) s'allonge. Certaines études indiquent que la malaria s'est propagée au Kenya, en Colombie et en Éthiopie, dans des régions de plus haute altitude, où il faisait auparavant trop froid pour que la maladie se développe. Cela expose des millions de personnes à un risque de contracter la maladie, et des mesures supplémentaires pour prévenir les épidémies de malaria devront être prises.

Figure 2.9.6 Les effets du changement climatique sur la santé



Une étude récente sur les impacts du changement climatique sur la santé publiée dans le Lancet Medical Journal fournit un ensemble d'indicateurs qui aident à comprendre les impacts du changement climatique sur la santé humaine, tels que la mortalité due à la chaleur, l'insécurité alimentaire et l'exposition à la pollution atmosphérique.

En ce qui concerne la chaleur extrême, par exemple, l'étude révèle que dans les petits États insulaires en développement, 103 jours de températures dangereuses pour la santé chaque année sont imputables au changement climatique sur la période 2018-2022. En Europe, en Amérique du Nord et en Océanie, ce nombre est inférieur à 30.

L'étude estime que dans un scénario de réchauffement de 2 °C, par exemple, 525 millions de personnes supplémentaires connaîtront l'insécurité alimentaire d'ici 2041 à 2060, par rapport à la moyenne de 1995 à 2014.

La combinaison du changement climatique, de l'urbanisation et des mouvements humains augmente l'incidence de maladies telles que la dengue. L'étude révèle que « les cas de dengue ont doublé chaque décennie depuis 1990, et près de la moitié de la population mondiale est désormais exposée au risque de contracter cette maladie potentiellement mortelle ».

Les inondations représentent également une menace indirecte pour la santé, puisqu'elles perturbent l'approvisionnement en eau et les systèmes d'assainissement, ce qui augmente le risque de maladies intestinales. De même, dans certaines régions du monde, en cas d'inondation, celles-ci peuvent s'accompagner de l'apparition de serpents venimeux et de crocodiles, comme cela a été le cas en Australie lors des inondations de 2011.

Les changements d'environnement et de mode de vie peuvent également entraîner stress psychologique et dépression. Vous avez probablement remarqué vous-même que parfois, lorsque le temps est mauvais, vous n'avez pas envie d'aller où que ce soit ou de faire quoi que ce soit. Par conséquent, comment les gens se sentiront-ils en cas de mauvaises temps de plus en plus fréquent ?

Quels sont les effets du changement climatique sur l'économie urbaine ?

Les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent perturber les transports, le réseau d'électricité et l'approvisionnement en eau des villes. Les inondations peuvent toucher les immeubles, les routes, les voies de chemin de fer, les ports et les aéroports. La hausse des températures entraîne une détérioration plus rapide du revêtement des chaussées, qui nécessite des réparations plus fréquentes. Les chutes soudaines de température en hiver provoquent la formation de glace qui endommage les lignes électriques, privant d'électricité foyers, écoles, hôpitaux et entreprises.

Avec la hausse des températures hivernales, les habitants des pays du nord pourront réduire les coûts de chauffage de leurs logements. Mais dans les pays du sud, les villes feront face à des coûts plus élevés car les besoins en climatisation seront plus importants en été.

Les études plus approfondies qui sont effectuées sur les effets du changement climatique sur les villes. sont essentielles, car une juste compréhension des conséquences possibles du réchauffement climatique permettra de compenser certains coûts. À titre d'exemple, les coûts de réparation des dommages occasionnés par une inondation peuvent être partiellement compensés par des économies de chauffage en hiver.

Comment pouvons-nous nous adapter et vivre dans des villes et des établissements plus sains et résilients au changement climatique ?

Les scientifiques du GIEC ont noté dans le AR6 que la croissance rapide des populations urbaines et les besoins non satisfaits en matière de logements et d'infrastructures sains, décents et durables constituent un problème constant. Mais l'urbanisation offre également de nombreuses possibilités d'intégrer des mesures d'adaptation dans la planification et le développement des villes et de leurs infrastructures. Il s'agit d'une priorité essentielle, étant donné que 2,5 milliards de personnes supplémentaires devraient vivre dans des zones urbaines d'ici 2050, avec jusqu'à 90 % de cette augmentation concentrée en Asie et en Afrique.

De nombreuses villes et agglomérations urbaines prennent déjà des mesures pour s'adapter aux impacts et risques climatiques actuels et à court terme dans le cadre de leur planification et de leurs politiques sociales et économiques. Ces actions comprennent des interventions et une planification d'ingénierie rigoureuses, telles que le développement ultérieur des transports publics urbains, l'ingénierie de défense contre les inondations, la refonte et la fortification des bâtiments, la mise en place d'abris anticycloniques, l'introduction de codes de construction résistants aux ouragans, l'élaboration de normes, de réglementations et de lignes directrices pour la construction, l'amélioration des systèmes de gestion des eaux pluviales, de drainage et de protection contre les inondations et, le cas échéant, le renforcement des infrastructures pour résister aux conditions de pergélisol. Il existe également un intérêt croissant pour la conception urbaine adaptative et les solutions basées sur la nature visant au refroidissement écologique, telles que les toits, les murs et les parcs verts. L'expansion des espaces verts et naturels améliore simultanément la biodiversité, la qualité de l'air et modère le cycle hydrologique ; cela contribue également à réduire les risques pour la santé associés au stress thermique et aux maladies respiratoires, et atténue les problèmes de santé mentale découlant de la vie urbaine encombrée. Les toits verts aux États-Unis (Fig. 2.9.7) sont un exemple de la façon dont les villes s'efforcent d'atténuer les effets du ruissellement des eaux pluviales, qui est un pollueur majeur des cours d'eau, tout en gardant les bâtiments plus frais.

Les mesures liées à la santé comprennent la refonte et la rénovation des maisons, des écoles et des établissements de soins de santé pour réduire les impacts de la chaleur extrême, la gestion de l'augmentation des maladies infectieuses telles que le paludisme et l'amélioration de l'accès aux services d'eau et d'assainissement. Les mesures prises dans différents secteurs pour faire face aux risques du changement climatique peuvent générer des bénéfices pour la santé et le bien-être humains. L'abandon des véhicules à combustion interne et des centrales électriques alimentées aux combustibles fossiles au profit des énergies renouvelables atténue les émissions de gaz à effet de serre, améliore la qualité de l'air et réduit les risques de maladies respiratoires. Les politiques et les conceptions qui facilitent le transport urbain actif (marche et vélo) augmentent l'efficacité de ce secteur, réduisent les émissions et améliorent la qualité de l'air ainsi que la santé physique et mentale des résidents. Les bâtiments économes en énergie et l'aménagement urbain améliorent la qualité de l'air intérieur et réduisent les risques de stress thermique et de maladies respiratoires. Les systèmes alimentaires qui mettent l'accent sur une alimentation saine et centrée sur les plantes réduisent les émissions du secteur agricole tout en contribuant à lutter contre la malnutrition.

Figure 2.9.7 **Aux États-Unis, les toits verts contribuent à réduire le ruissellement des eaux pluviales et à rafraîchir les bâtiments**

QUESTIONS

1. La population mondiale vit-elle en majorité dans les villes ou en dehors ?
2. Où fait-il le plus chaud : en ville ou en périphérie ?
3. Pourquoi les îlots de chaleur sont-ils mauvais pour la santé ?
4. Pouvez-vous énumérer trois mesures d'adaptation au changement climatique dans les villes ?
5. Quels sont les impacts négatifs du réchauffement climatique sur la santé humaine ? Que sont les maladies à transmission vectorielle ?
6. Quelles précautions prendre par temps chaud ?

EXERCICES

1

Si vous partez en vacances d'été à la campagne, placez un thermomètre dehors, à l'ombre, à hauteur d'homme au-dessus du sol, et consignez la température que celui-ci indique tôt le matin (avant que le soleil ne commence à élever la température de l'air). Comparez-la le même jour aux prévisions de température nocturne émises pour la grande ville la plus proche. Les chiffres sont-ils différents ? Pourquoi ?

2

À l'aide de manuels, de livres de référence et d'Internet, déterminez et écrivez comment vous pourriez aider quelqu'un souffrant d'un coup de chaleur, d'une insolation, de gelures, d'une réaction allergique sévère au pollen, ou quelqu'un ayant été mordu par une tique. Quelles sont les mesures préventives que vous pouvez prendre pour préserver votre santé en période de canicule ?

2.10 Les effets du changement climatique sur **les problèmes sociaux**

Des mondes si différents : les pays développés et les pays en développement

Il y a plus de 200 pays dans le monde. Tous les pays sont très différents les uns des autres, avec une situation géographique, un territoire, un environnement naturel, un climat, une population, une économie, un niveau de vie, une histoire et des traditions différents. Ils ont contribué à différents niveaux au changement climatique et en sont tous affectés différemment. Ils diffèrent également de par leur capacité à faire face aux nouveaux problèmes climatiques.

Les pays sont souvent divisés en deux grands groupes en fonction de leur niveau de développement : les « pays développés » et les « pays en développement ».

Les pays développés sont des pays relativement riches bénéficiant de conditions de vie favorables et d'une économie forte, où l'industrie, les services et le secteur financier jouent un rôle majeur. Les personnes vivant dans ces pays bénéficient généralement de la sécurité sociale, ont accès à des soins de santé et une éducation de qualité, à des opportunités professionnelles satisfaisantes, et ont des revenus relativement élevés leur permettant de dépenser de l'argent en restaurants, shopping ou voyages. Le groupe des pays développés est normalement composé des USA, du Canada, de l'Australie, de la Nouvelle-Zélande, des pays européens, du Japon, de Singapour, de Hong Kong et d'Israël. Certains pays d'Europe de l'Est, dont la Russie, ayant une **« économie en transition »**, constituent un sous-groupe au sein du groupe des pays développés. Le terme « économies en transition » vient du fait que ces pays sont passés, depuis les années 1990, d'une économie centralisée à une économie de marché.

Les pays en développement, en tant que groupe, se trouvent à un stade plus précoce de leur développement économique et social que les pays développés. Nombre de ces pays dépendent encore fortement de l'agriculture, du commerce des matières premières et de l'exploitation minière. De larges pans de la population ont un niveau de vie inférieur, un accès inégal aux soins de santé, moins de programmes sociaux et moins de possibilités d'éducation et d'emploi.

Le groupe des pays en développement est extrêmement diversifié. Il se compose **d'économies émergentes** (pays nouvellement industrialisés) comme la Chine, l'Inde, la Corée du Sud, la Turquie, le Brésil, l'Argentine, et le Mexique, avec une croissance rapide de la production industrielle. La Chine et l'Inde font aujourd'hui partie des dix plus grandes économies du monde. De nombreuses choses que nous utilisons chaque jour (vêtements, chaussures, plats, mobilier, appareils, jouets) sont fabriqués dans ces pays, notamment en Chine.

La Chine est le leader mondial en termes de volume de produits manufacturés qu'elle produit chaque année, suivie par les États-Unis.

D'autre part, 46 pays sont reconnus comme les pays **les moins développés** du monde. Ils comprennent les petits états insulaires, les pays montagneux enclavés, ainsi que les pays comptant des territoires surpeuplés et des conditions climatiques défavorables. Ces pays, dont les économies sont faibles, sont très pauvres, et leur population et leur mode de vie sont extrêmement vulnérables aux effets du changement climatique et aux catastrophes naturelles. La plupart des pays les moins développés se situent en Afrique et en Asie, et les plus pauvres d'entre eux, selon la banque Mondiale sont l'Afghanistan, le Burundi, le Tchad, la République démocratique du Congo, le Liberia, le Malawi, le Mozambique, le Niger et la Somalie. La pauvreté dans la plupart de ces pays est fréquente, la majeure partie de la population vivant avec moins de 2 dollars américain par jour. La population manque de nourriture, d'eau potable, d'hôpitaux et d'écoles. Les familles pauvres tentent donc d'avoir autant d'enfants que possible qui aideront les parents dans les travaux ménagers, contribueront au revenu de la famille, et qui les prendront en charge durant leur vieillesse. Les mauvaises conditions sanitaires, des pénuries d'eau potable et de nourriture, ainsi qu'un manque de dispensaires et d'hôpitaux favorise le décès de nombreux enfants en bas âge, par conséquent, le fait d'avoir beaucoup d'enfants est un moyen de s'assurer qu'au moins certains d'entre eux survivront. Environ 880 millions de personnes (12 % de la population mondiale) vivent actuellement dans les pays les plus pauvres du monde qui contribuent à moins de 2 % de l'économie mondiale.

L'inégalité sociale

En 2023, la population mondiale a dépassé les 8 milliards. La grande majorité de la population mondiale – 6,64 milliards, ou 83 % de la population totale – vit dans des pays en développement, et seuls 17 % ou 1,36 milliard de personnes (aussi appelé le « milliard de fortunés ») vivent dans des pays développés.

Il n'est pas surprenant que les 17 % d'habitants des pays riches consomment la part du lion de la production mondiale, compte tenu de leurs revenus élevés et de leurs exigences en matière de mode de vie. Faire fonctionner des entreprises industrielles et créer la production quotidienne pour les habitants des pays riches nécessite d'énormes quantités de ressources et d'énergie. Les plus gros consommateurs d'énergie sont l'Islande, la Norvège, le Canada, les États-Unis et les pays riches du Moyen-Orient comme Oman, l'Arabie saoudite et le Qatar. L'habitant moyen de ces pays consomme jusqu'à 100 fois plus que l'habitant moyen de certains des pays les plus pauvres. Par exemple, l'Américain moyen a besoin de 3,5 fois plus de ressources au cours de sa vie que l'habitant moyen de la Terre, et l'Américain moyen utilise neuf fois plus d'énergie que l'Indien moyen. Ainsi, la contribution des habitants des pays développés aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (leur « empreinte carbone ») est bien plus élevée que celle des habitants des pays en développement, et ils portent une plus grande responsabilité dans les conséquences du changement climatique.

L'écart entre la qualité de vie des riches et celle des pauvres, à l'échelle mondiale, est énorme. Le revenu moyen dans les 20 pays les plus riches est 37 fois supérieur à celui des 20 pays les plus pauvres. Par conséquent, pour chaque 100 dollars américains de revenu perçus par le citoyen européen ou américain moyen, un habitant du Népal ou d'Éthiopie ne perçoit que 2,5 dollars américains. Les revenus des 500 personnes les plus riches du monde excèdent le revenu total des 416 millions de personnes les plus pauvres de la planète.

Pire encore, les taux de natalité particulièrement élevés dans les pays en développement impliquent que leur taux de croissance démographique est 3,5 fois supérieur à celui des pays développés. Les populations de nombreux pays parmi les plus pauvres d'Afrique et d'Asie pourraient doubler en moins de 40 ans. Par conséquent, le nombre de personnes appartenant aux populations les plus pauvres de la planète continue à augmenter.

L'écart entre les riches et les pauvres, à l'échelle mondiale, est énorme. Les populations des pays développés, qui représentent seulement 17 % de la population mondiale, consomment la majeure partie de la production mondiale et plus de 70 % de toute l'énergie, tandis que près de 2,5 milliards de personnes dans le monde vivent avec moins de 2 dollars américains par jour.
Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 770 millions de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et 821 millions de personnes n'ont pas la nourriture dont elles ont besoin pour mener une vie active et saine.

Il serait erroné de penser que la pauvreté se limite aux pays les moins développés. Les pays riches comptent également des régions arriérées et des pauvres. Aux États-Unis, par exemple, le Bureau de recensement estime que le nombre de pauvres s'élevait à 38 millions de personnes en 2021, soit environ 12 % de la population totale. En Allemagne, près d'une personne sur sept, soit 13,5 millions au total, vit en deçà du seuil de pauvreté. Bien souvent, les personnes les plus pauvres des pays développés sont des personnes venant de pays en développement afin d'y travailler, ainsi que des personnes vivant en zone rurale et dans des villes industrielles en déclin, où les mines et les usines ferment par manque de rentabilité.

Toutefois, les situations d'un Américain pauvre et d'un Africain pauvre sont bien différentes ! Le seuil de pauvreté aux États-Unis est établi à un revenu annuel de 22 000 dollars américains pour une famille de quatre personnes, soit environ 15 dollars américains par jour et par personne. Cela est vraiment très peu compte tenu des prix élevés des produits de première nécessité aux USA. Mais pour un Africain pauvre, un Américain indigent disposant de son propre logement, avec une salle de bain et des toilettes, ressemble à Rockefeller.

Les inégalités criantes en matière de conditions de vie (distribution inégales des revenus et des opportunités entre les populations de notre planète) sont devenues l'un des problèmes sociaux les plus urgents dans le monde à l'heure actuelle. Comme l'a indiqué le Rapport sur le développement humain 2013 du Programme des Nations Unies pour le développement : « Toute personne a le droit de mener une vie épanouissante selon ses valeurs et ses aspirations personnelles. Personne ne devrait être condamné à une existence brève et misérable du seul fait d'être né au sein de la « mauvaise » classe ou race, du « mauvais » groupe ethnique ou sexe. » Malheureusement, le changement climatique ne fait qu'exacerber le problème des inégalités sociales et complique la tâche de lutte contre la pauvreté. La récente pandémie de COVID-19 a aggravé ces problèmes et, en deux ans, a annulé certains des acquis en matière de développement social et économique, de réduction de la pauvreté et de réduction des inégalités (Rapport du PNUD sur le développement humain 2021-2022).

Le changement climatique aggrave les problèmes sociaux

Nous avons déjà vu de quelle façon chaque région et pays du monde est affecté par le changement climatique, mais nous avons également vu comment certains d'entre eux (les régions ou pays côtiers, montagneux ou agricole) sont davantage affectés par les conséquences du changement climatique que d'autres. Cela tient du fait que le mode de vie et l'économie des populations locales dépendent fortement des conditions naturelles et du climat, de sorte que tout changement occasionne de graves problèmes pour l'économie et la société.

Les populations des régions et pays pauvres dépendent principalement de l'agriculture pour leur subsistance, par conséquent tout(e) sécheresse, inondation ou ouragan les prive instantanément de leur seule source de revenu. Les pays comme le Bangladesh, Haïti ou le Tchad sont non seulement parmi les premiers à ressentir les effets du changement climatique, mais ils ne disposent également pas de suffisamment de ressources et de capacités pour faire face aux risques potentiels.

Dans les pays pauvres, les effets du changement climatique se font majoritairement ressentir au niveau des femmes, qui sont principalement responsables de l'éducation des enfants, qui doivent s'occuper des malades et des personnes âgées, nourrir leur famille, cultiver les terres, et collecter de l'eau et du carburant. Toutes ces tâches sont sérieusement impactées par le changement climatique.

Dans toutes les régions, et même dans les pays à revenu élevé, les enfants en bas âge, les personnes âgées et les personnes handicapées sont particulièrement exposées car leur état de santé dépend fortement des conditions météorologiques.

L'INJUSTICE CLIMATIQUE
réside dans le fait que les populations qui sont le moins responsables du réchauffement climatique pourraient être celles qui seront le plus affectées

Migration due au changement climatique

Le changement climatique force des dizaines de millions de personnes à migrer afin d'échapper aux effets des tempêtes, sécheresses et inondations. Selon les recherches effectuées par la Columbia Climate School of Columbia University, en 2017, environ 23 millions de personnes dans le monde ont quitté leurs foyers en raison de phénomènes météorologiques extrêmes. Environ 44 millions de personnes supplémentaires ont été déplacées en raison de « crises humanitaires », probablement exacerbées par les effets en cascade du changement climatique. Selon les prévisions, leur nombre pourrait atteindre 200 à 250 millions d'ici 2050.

Les régions exposées à un risque de migration de masse sont notamment les deltas du Mékong et du Gange en Asie du Sud-Est. Il s'agit de régions agricoles à forte densité de population, mais la montée prévue du niveau de l'eau de ces fleuves à 2 m entraînera l'inondation de vastes superficies de terres arables. Les populations locales travaillant dans ces champs seront contraintes de chercher de nouveaux endroits où vivre et travailler.

Des sécheresses ou inondations fréquentes, avec des conséquences particulièrement graves pour l'agriculture, obligeront de nombreux habitants de zones rurales à migrer vers les villes pour chercher du travail. De telles migrations conduisent à la création de quartiers entiers de migrants pauvres – des bidonvilles avec des conditions sanitaires déplorables et un taux élevé de criminalité.

Un nombre croissant d'habitants des îles Caraïbes quittent leurs foyers en raison de tempêtes tropicales et de tornades plus fréquentes, car ces pays n'ont pas les moyens suffisants pour faire face au durcissement des conditions climatiques.

Figure 2.10.1 Bidonvilles à Rio de Janeiro (Brésil)

Figure 2.10.2

Un camp de migrants ayant été contraints de quitter leurs foyers en raison d'une forte sécheresse (Somalie, 2011)

Figure 2.10.3

Les conséquences de l'ouragan Haiyan (Philippines, 2013)

L'Australie et la Nouvelle-Zélande ont accueilli des migrants climatiques en provenance des états insulaires d'Océanie. Les archipels des îles Tuvalu et Kiribati, situées non loin de l'Australie, disparaissent progressivement sous les eaux, à mesure que le niveau des océans monte. En Australie, les écologistes pressent le gouvernement d'allouer également un quota spécial pour ces réfugiés climatiques. De la même façon, le gouvernement des Maldives a convenu avec le Sri Lanka (qui est aussi une nation insulaire) de procéder à la réinstallation de sa population en cas de menace imminente de disparition de ce chapelet d'îles.

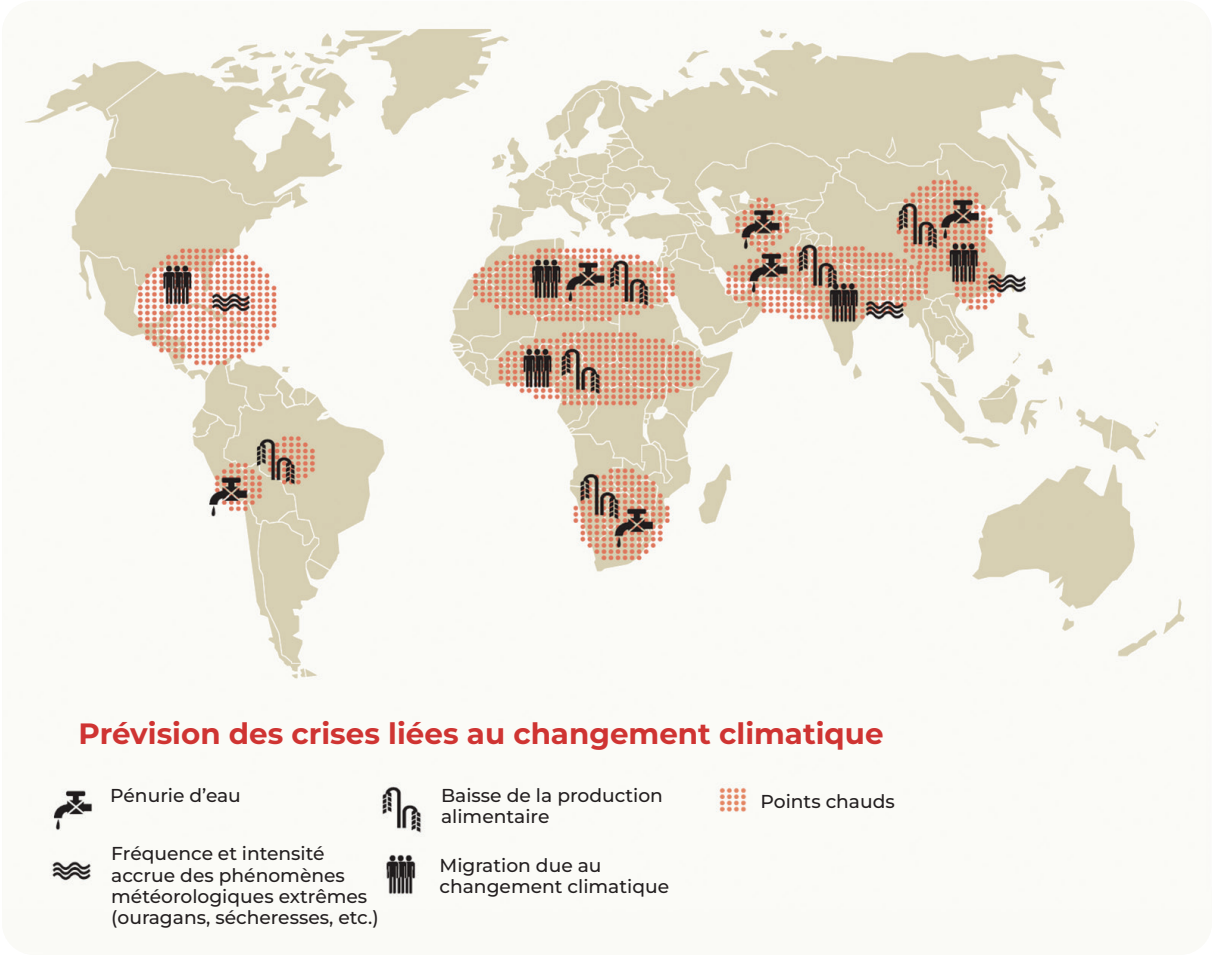
La nation insulaire de Kiribati est principalement composée d'îles coralliennes, qui se situent en moyenne à seulement 2 m au-dessus du niveau de la mer, par conséquent la montée du niveau des océans pourrait les submerger dans les 50 prochaines années. En 2012, le gouvernement des îles a décidé d'acheter des terres dans la République des Îles Fidji, où les citoyens de l'archipel de Kiribati pourront se réinstaller si leurs foyers risquent de disparaître sous la mer.

Nouveaux conflits

Dans différentes régions, le changement climatique peut occasionner de graves conflits entre les populations, avec des conséquences sociales considérables notamment sur les questions de droits fonciers, de pénurie d'eau et de migration climatique (Fig. 2.10.4).

Les régions en rouge sont particulièrement exposées au risque de conflits liés au changement climatique. Ces régions sont menacées par les sécheresses prolongées, les pénuries d'eau, la montée du niveau des océans, la salinité du sol et de mauvaises récoltes, le manque d'accès aux ressources énergétiques et d'autres facteurs susceptibles de provoquer des crises sociales et politiques, ainsi qu'une augmentation des flux migratoires.

Figure 2.10.4 Zones de crises potentielles liées au changement climatique



Coopération internationale en matière d'assistance sociale

Des programmes d'assistance spéciaux à destination des populations les plus vulnérables de la société sont nécessaires pour réduire les risques sociaux liés au changement climatique. Ceux-ci pourraient comprendre : la formation et la réorientation professionnelle des personnes vivant en zone rurale, en leur offrant une alternative professionnelle à l'agriculture ; des projets de réinstallation des habitants des régions menacées ; la création de nouveaux emplois dans les régions pauvres ; la recherche de nouvelles variétés de cultures plus résistantes à la sécheresse ; et la création d'alertes précoces en cas de catastrophe naturelle. Toutes ces mesures exigent néanmoins de l'argent que les pays et populations pauvres n'ont pas.

Plusieurs fonds et instruments financiers ont déjà été créés afin d'aider les pays en développement à surmonter les problèmes sociaux associés aux effets défavorables du changement climatique. Les principaux donateurs sont les gouvernements des pays développés, les grandes entreprises et les organisations internationales, essentiellement les Nations Unies.

QUESTIONS

1. En quoi les pays développés sont-ils différents des pays en développement ?

2. La plus grande partie de la population mondiale vit-elle dans des pays développés ou en développement ?

3. Quels sont les pays les plus vulnérables au changement climatique ? Pourquoi ?

4. Pourquoi les effets du changement climatique affectent-ils davantage la population mondiale pauvre ?
Quels sont les problèmes sociaux susceptibles d'être aggravés par le changement climatique ?

5. Les animaux et les plantes ne peuvent s'adapter aux changements climatiques rapides, qu'en est-il de l'homme ?

EXERCICES

1

Sur une carte du monde, identifiez les 20 pays les plus performants en termes de développement économique, et coloriez-les à l'aide d'un crayon vert. Sur cette même carte, identifiez les 20 principaux pays responsables des émissions de gaz à effet de serre en fonction du volume (données disponibles sur Wikipédia) et coloriez-les en rouge.

Y a-t-il beaucoup de chevauchements ? Parmi les grandes puissances mondiales, combien apparaissent désormais en « marron foncé », ce qui indique qu'elles sont parmi les plus nuisibles pour le climat de la Terre ?

Expliquez pourquoi ces pays sont les principaux responsables du changement climatique en cours.

2

Imaginez que vous travaillez pour un fonds international allouant des fonds à des projets de lutte contre les conséquences du changement climatique. Quels projets visant à aider les pays pauvres financeriez-vous en priorité ?

3

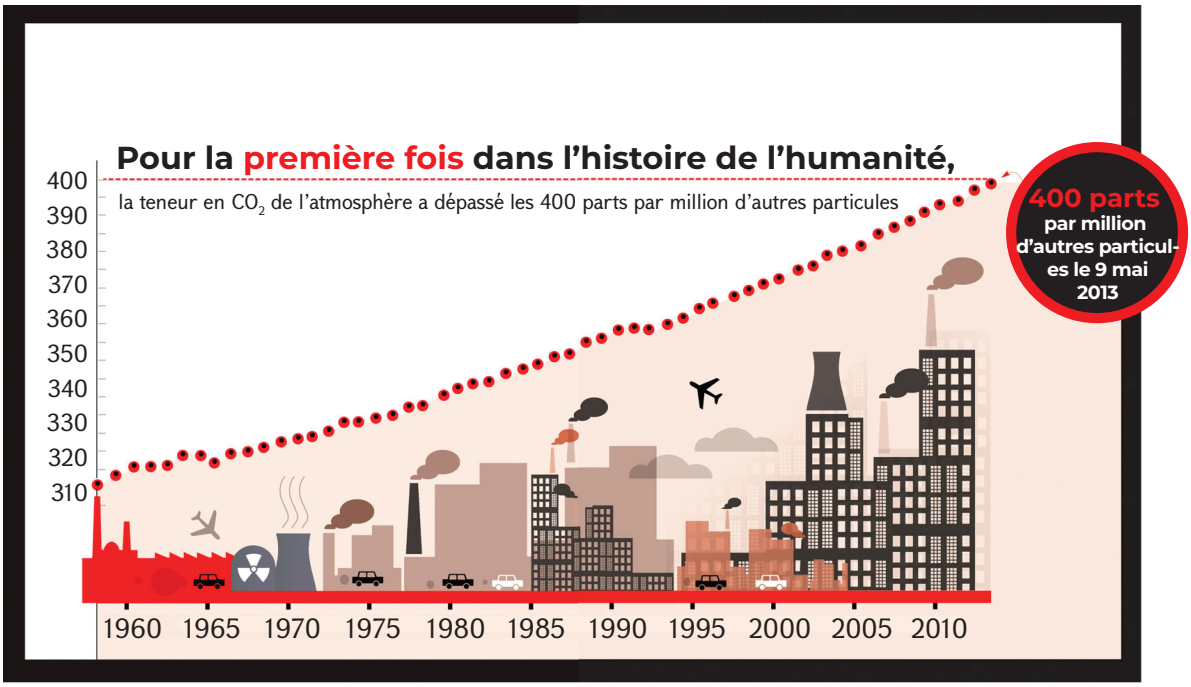
Comment éviter les changements climatiques dangereux ?

3 Comment éviter les changements climatiques dangereux ?

Nous savons déjà que la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère s'est accrue rapidement ces dernières années, aboutissant à une hausse de ses concentrations dans l'atmosphère (Fig. 3.1.1). La teneur naturelle en dioxyde de carbone de l'atmosphère a varié depuis quelques milliers d'années (lesquelles incluent les périodes de réchauffement interglaciaire et de refroidissements glaciaires) entre 180 et 300 particules de CO_2 par million d'autres particules.

En 2013, le niveau de CO_2 contenu dans l'atmosphère a dépassé 400 parts par million pour la première fois en 800 000 ans. Cette concentration continue de croître rapidement, atteignant des niveaux de 421 parties par million en 2022. La raison en est que, à l'échelle mondiale, les émissions nettes de gaz à effet de serre (GES) dues à l'activité humaine, définies comme la différence entre les émissions brutes moins les absorptions, par exemple par les forêts, ont continué à croître. Entre 2010 et 2022, le niveau d'émissions de GES a été plus élevé qu'à tout autre moment de l'histoire de l'humanité. Leur concentration dans l'atmosphère continuera d'augmenter jusqu'à ce que les émissions annuelles soient suffisamment réduites pour être compensées par les absorptions.

Figure 3.1.1 **Augmentation des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère depuis 1960.**



Tous les habitants de la planète contribuent au changement climatique actuel en émettant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère année après année. Nous sommes les utilisateurs finaux des biens et des services, dont la production requiert de l'énergie, une énergie provenant essentiellement de carburants fossiles non renouvelables (pétrole, charbon et gaz naturel). La production de biens et de services est responsable de 75 % de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre associées à l'activité humaine.

Nous avons déjà évoqué les impacts dévastateurs du changement climatique sur la santé de notre société et de la planète. Les scientifiques ont confirmé que les récents changements climatiques sont généralisés, rapides, intensifiés et sans précédent depuis des milliers d'années. De tels changements devraient se poursuivre, car selon tous les scénarios d'émissions présentés dans le rapport AR6 du GIEC, le réchauffement de la surface de la Terre devrait atteindre 1,5 °C au cours des deux prochaines décennies. À moins de réductions immédiates, rapides et à grande échelle des émissions de gaz à effet de serre, limiter le réchauffement à 1,5 °C, voire 2 °C, sera bientôt hors de portée.

Pour réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et limiter le réchauffement climatique, des réductions fortes, rapides et soutenues du CO_2, du méthane et des autres gaz à effet de serre au cours de cette décennie et atteindre zéro émission nette d'ici 2050 sont essentielles. Associées à la réduction des « forces climatiques de courte durée » telles que les aérosols et les particules, ces mesures permettraient non seulement de réduire les conséquences du changement climatique, mais également d'améliorer la qualité de l'air, de réduire les impacts sur la santé et d'apporter d'autres avantages en matière de développement durable. De telles réductions doivent suivre une approche positive pour la nature, qui peut contribuer à enrichir la biodiversité, à stocker le carbone, à purifier l'eau et à réduire le risque de pandémie. Bref, réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère devrait également renforcer la résilience de notre planète et de nos sociétés.

De nombreux pays ont pris des mesures pour réduire leurs émissions. Depuis 2022, la plupart des pays industrialisés ont réduit régulièrement leurs émissions de gaz à effet de serre depuis plus de dix ans et de nombreux pays en développement ont pris des mesures pour ralentir la croissance des émissions. Cependant, les scientifiques nous ont montré que cela ne suffit pas et que nous avons besoin d'une transformation du système dans tous les pays et dans tous les secteurs de l'économie et de la société vers zéro émission nette d'ici le milieu du siècle.

Qu'est-ce que cela signifie concrètement et comment pouvons-nous réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ? Il existe plusieurs façons de procéder.

La première consiste à passer à des **sources d'énergie respectueuses du climat**. Si nous comparons les différents types de combustibles fossiles, le plus polluant est le charbon, suivi du pétrole et des produits pétroliers, et le moins polluant est le gaz naturel.

Il est néanmoins possible de produire de l'énergie sans utiliser aucun combustible fossile. Depuis l'Antiquité, les populations utilisent la chaleur du soleil, la puissance du vent et la force de l'eau, ainsi que la biomasse. Toutes sont des sources d'énergie renouvelable. Les technologies modernes permettent de les utiliser à plus grande échelle. Une augmentation rapide du recours aux sources d'énergie renouvelables devrait aller de pair avec l'élimination progressive des énergies fossiles. D'autres sources d'énergie sans carbone, comme l'énergie nucléaire, peuvent également contribuer à réduire les émissions dans de nombreux pays, à condition que toutes les mesures de sécurité nécessaires soient en place.

La seconde façon de réduire les émissions de gaz à effet de serre consiste à **diminuer notre consommation énergétique quotidienne**, en mettant au point des machines et des appareils électroménagers plus économes en énergie, en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments et en augmentant l'électrification et le stockage de l'énergie. Les processus industriels actuels, tels que la sidérurgie et le ciment, doivent être remplacés par des processus sans carbone, et l'électrification des transports doit s'accélérer. Nous devons également changer nos propres habitudes pour économiser l'énergie et l'eau.

La troisième option consiste à avoir recours aux plantes pour nous aider ou à utiliser des technologies qui éliminent le CO_2 de l'atmosphère. Les plantes et les arbres absorbent le CO_2. Ainsi, en réduisant la déforestation et en plantant des arbres, les gens peuvent réduire la quantité de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'utilisation de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement ainsi que la restauration et la protection des écosystèmes naturels peuvent aider les sols à absorber davantage de carbone et apporter d'autres avantages en matière de développement durable. Les nouvelles technologies qui éliminent le CO_2 de l'atmosphère, comme le captage et le stockage du carbone ou l'élimination du CO_2, en sont aux premiers stades de développement et de démonstration. Ils promettent que certaines émissions qui ne peuvent être évitées, par exemple certaines émissions résiduelles de l'agriculture, seront bientôt captées par ces technologies émergentes.

Enfin, le changement climatique est un problème mondial complexe qui ne peut être résolu qu'avec la coopération de tous les gouvernements et une « approche pansociétale » qui implique particulièrement les entreprises dans les efforts visant à gérer le risque climatique et à divulguer ce risque dans le cadre de leurs pratiques commerciales.

3.1 Les énergies « vertes »

3.1.1 Qu'est-ce que l'énergie ?

Tout ce qui a été créé en ce monde, par la nature ou par l'homme, a été créé en utilisant de l'énergie. Pour obtenir quelque chose, une quelconque forme d'énergie, nous devons la tirer de quelque part.

Prenons une barre de chocolat. Elle arrive en boutique directement de l'usine où les ouvriers se sont chargées de sa fabrication et de son conditionnement. Pour ce faire, ces personnes ont utilisé des fèves de cacao et du sucre acheminés jusqu'à l'usine depuis des champs où d'autres personnes cultivent des fèves de cacao et de la canne à sucre. Toutes les personnes ayant travaillé à la fabrication de notre chocolat devaient se nourrir et s'acheter des vêtements. L'ensemble des machines et appareils utilisés pour la fabrication de la barre de chocolat sont fabriqués à partir de matériaux (acier, plastique, etc.) provenant de minéraux (minerai de fer, etc.) extraits de la terre, et ces machines fonctionnent à l'énergie. Tout ce que nous possédons a donc été fabriqué en utilisant de l'énergie. Nous-mêmes nous sommes développés à partir d'un minuscule embryon, qui a puisé de l'énergie dans les composés chimiques afin d'assurer sa croissance !

Est-il dont vrai que nous prenons à la nature sans jamais rien lui donner en retour ? Bien sûr que non ! Nous transformons l'énergie que nous recevons en d'autres formes et la restituons au monde. L'énergie elle-même n'a donc jamais disparu, mais a simplement changé d'état. La science qui étudie la plupart des lois générales de transformation et de transfert de l'énergie mécanique et thermique est appelée la **« thermodynamique »**, qui est une branche de la physique. La loi de conservation de l'énergie est la première des lois de la thermodynamique.

Les autres lois de la thermodynamique nous indiquent qu'au moment où l'énergie change d'état, une petite partie se perd et se dissipe et ne peut être « ée ».

Voyons comment les populations utilisent l'énergie de nos jours. Pourquoi la consommation d'énergie et le changement climatique sont-ils si étroitement liés ?

Et l'humanité peut-elle utiliser l'énergie pour transformer l'économie et la société mondiales, en rendant la vie sur Terre écologique, florissante et heureuse ? Plus important encore, pouvons-nous commencer à œuvrer pour cette transformation ?

3.1.2 Les principales sources d'énergie

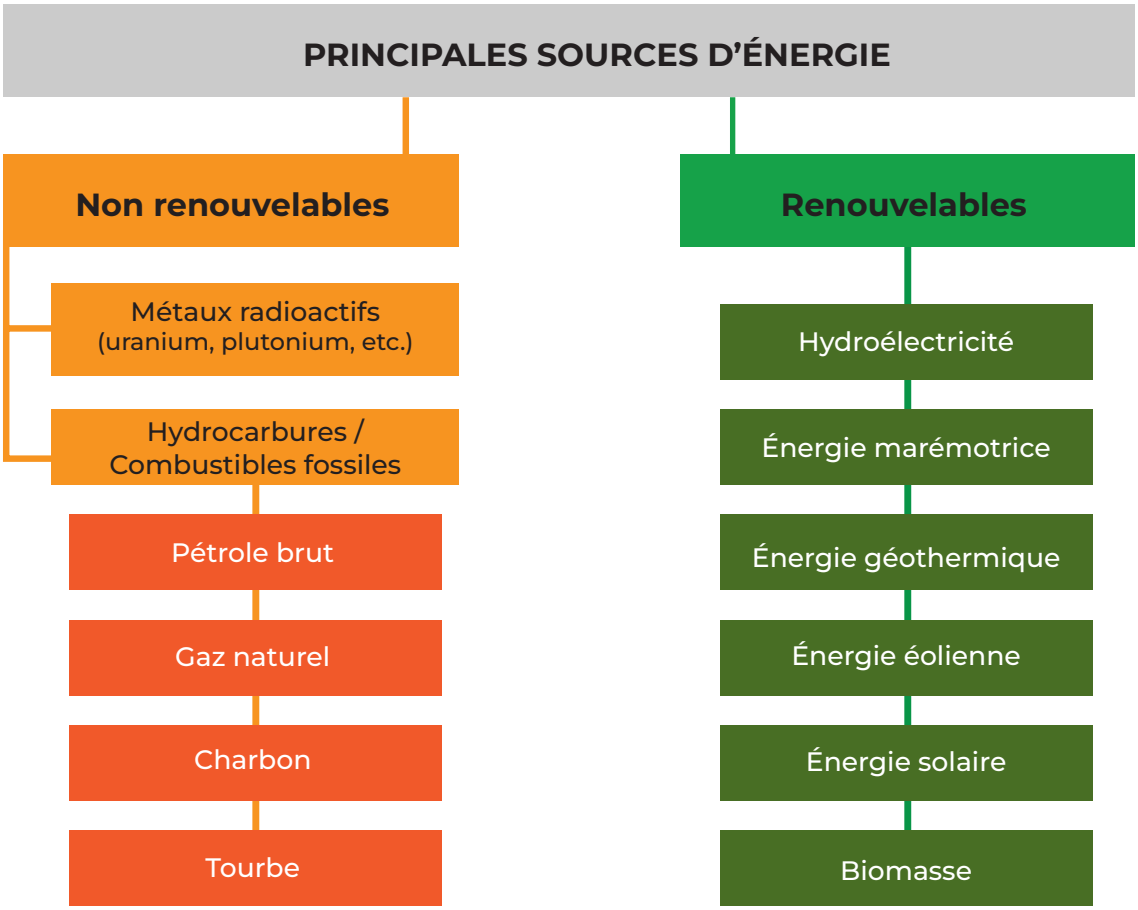
Les gens ont toujours utilisé de l'énergie. Les scientifiques ont commencé à réfléchir à ce processus dès l'Antiquité, lorsqu'ils ont commencé à étudier la forme d'énergie la plus simple : l'énergie mécanique, appelée « force vive ». Progressivement, d'autres formes d'énergie ont été découvertes : électrique, électromagnétique, thermique et nucléaire. En découvrant de nouvelles formes d'énergie, les gens se sont penchés sur leur provenance et se sont mis à la recherche de moyens pour l'exploiter.

Dans notre vie quotidienne, nous utilisons un très grand nombre d'appareils. Les postes de télévision, les ordinateurs et les réfrigérateurs fonctionnent tous à l'électricité, laquelle est raccordée à nos foyers et qui est le type d'énergie que nous connaissons le mieux. Cela signifie que l'électricité est essentielle à de nombreux domaines de la vie dans les sociétés modernes et le deviendra encore plus à mesure que son rôle dans le transport et le chauffage se développera grâce à des technologies telles que les véhicules électriques et les pompes à chaleur. Le rôle de l'électricité dans l'industrie va également augmenter en raison de l'électrification de certains processus industriels, comme la production sidérurgique.

D'où provient l'électricité ?

Les gens ont appris à produire de l'électricité en transformant plusieurs types d'énergie offerts par la nature. Les sources naturelles d'énergie de notre planète sont généralement divisées en deux grands groupes : les énergies non renouvelables (ou traditionnelles) et les énergies renouvelables (ou alternatives) (Fig. 3.1.2).

Figure 3.1.2 Principales sources naturelles d'énergie

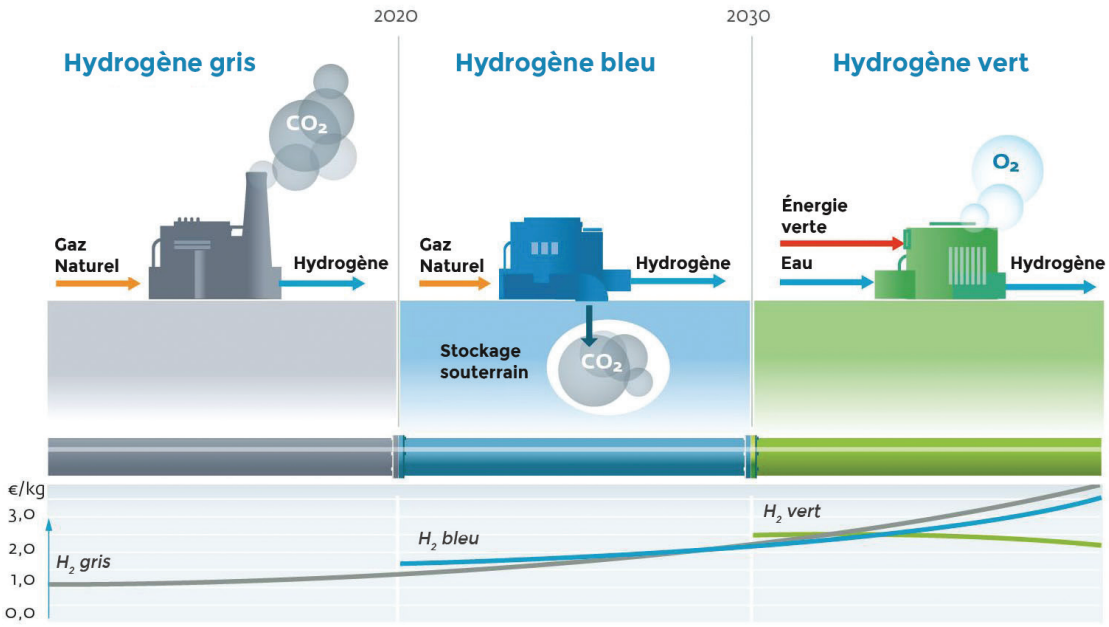


Les sources d'énergie non renouvelables sont produites ou se renouvellent dans la nature beaucoup plus lentement qu'elles ne sont consommées par l'homme. Les principales sources d'énergie non renouvelables sont le charbon, le pétrole, le gaz naturel et la tourbe, et sont également appelées « hydrocarbures » ou « combustibles fossiles ». Les sources d'énergies non renouvelables englobent également les métaux radioactifs (uranium, plutonium et autres), lesquels sont utilisés afin de produire de l'énergie nucléaire.

Les sources d'énergies renouvelables puisent leur énergie de processus qui se produisent continuellement dans la nature. Les rayons du soleil, le vent, l'eau, la pluie, les marées et la chaleur provenant de la terre peuvent offrir de grandes quantités d'énergie. De plus, ces ressources sont quasiment inépuisables : elles ne s'épuiseront que si, dans un futur plus que lointain, notre système solaire achève son cycle de vie. La biomasse (fibre végétale, déchets animaux et charbon de bois, qui ont été largement utilisés par le passé) est également une source d'énergie renouvelable, puisqu'elle est se renouvelle rapidement dans la nature.

L'hydrogène est un nouveau carburant dont l'utilisation est de plus en plus répandue. Il peut être gris, bleu ou vert, selon les sources à partir desquelles il est produit – respectivement gaz naturel, gaz naturel avec captage et stockage du carbone et électricité renouvelable (Fig. 3.1.3). Alors que l'hydrogène était autrefois principalement utilisé comme matière première pour l'industrie lourde, il est désormais à l'avant-garde de la décarbonation des secteurs du transport et du transport maritime.

Figure 3.1.3 **Types d'hydrogène, comment ils sont produits et année de début de production**



3.1.3 Les combustibles fossiles

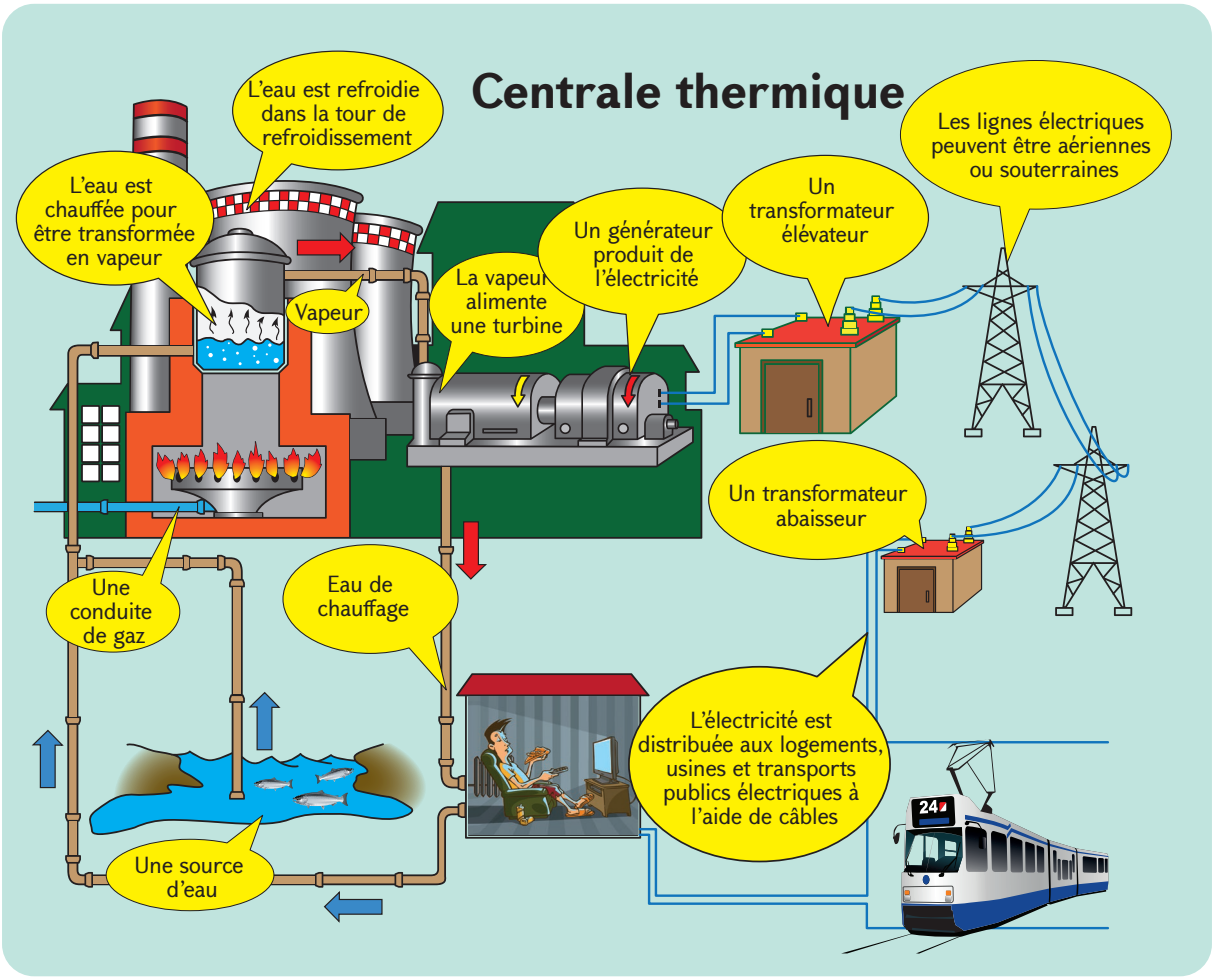
L'évolution des organismes vivants de notre planète va du plus simple au plus complexe. À une certaine époque, la Terre n'était habitée que par des végétaux et organismes simples qui absorbaient l'énergie solaire et la transformaient en poids vif, à l'intérieur d'eux-mêmes. Les traces de leur existence sont toujours visibles à ce jour : l'énergie recueillie par ces formes de vie, nos prédécesseurs, n'a pas disparu mais continue de vivre dans ce que nous appelons les « combustibles fossiles », qui sont des substances qui ont été formées à partir des restes d'organismes morts. Le pétrole brut, le gaz naturel, le charbon et la tourbe sont des combustibles fossiles.

Les combustibles fossiles sont l'héritage d'êtres vivants qui sont apparus sur Terre avant nous, et nous devrions les utiliser avec parcimonie et gratitude. Nous devons garder à l'esprit qu'aucun héritage n'est inépuisable. Si nous les utilisons sans réfléchir, il ne restera plus rien pour nos enfants.

La combustion de combustibles fossiles, également nommés hydrocarbures (charbon, pétrole ou gaz naturel) peut produire de l'électricité. Ce processus se produit dans les centrales thermiques. La salle des machines d'une centrale thermique est équipée d'une chaudière. La combustion de combustible chauffe l'eau de la chaudière et la transforme en vapeur. La pression de vapeur fait tourner les pales d'une turbine, laquelle actionne un générateur, qui génère du courant électrique. L'électricité est acheminée vers les logements et autres installations à l'aide de lignes électriques (Fig. 3.1.4).

Les énergies hydrocarbures (combustibles fossiles) sont le pétrole, le charbon, le gaz naturel (y compris le gaz de schiste produit à partir de charbon et de formations de schiste), l'huile de schiste et d'autres minéraux et substances inflammables produits par une exploitation souterraine ou à ciel ouvert. Les combustibles fossiles se forment sur des millions d'années, dans la croûte terrestre, à partir des restes d'organismes vivants. Leur combustion extrait et exploite leur énergie thermique.

Figure 3.1.4 Fonctionnement d'une centrale thermique



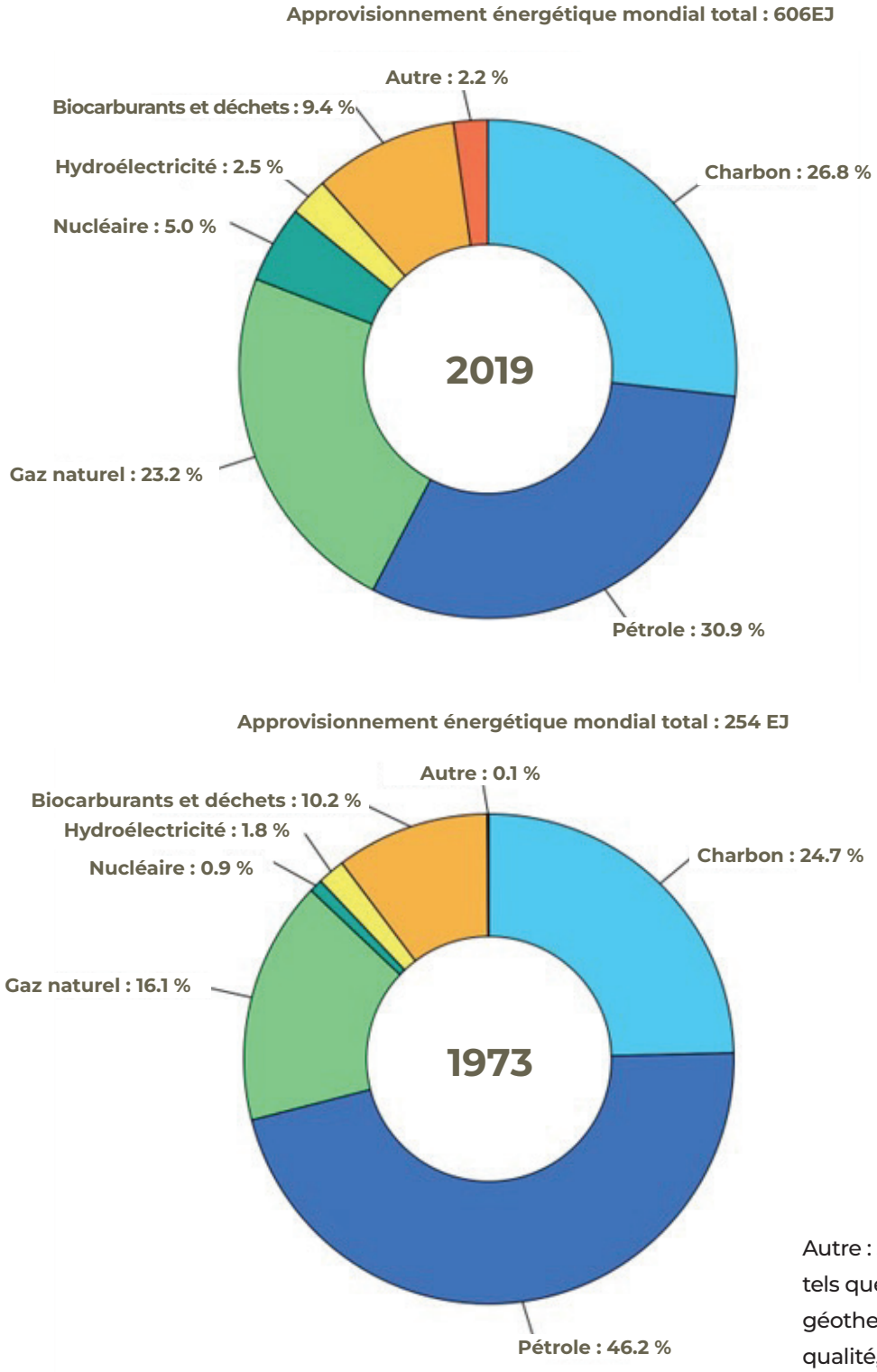
Constatation a été faite que la production d'électricité pouvait être efficacement combinée à la production d'eau chaude, ensuite acheminée via des conduites jusqu'aux systèmes de chauffage et d'eau chaude des bâtiments résidentiels, hôpitaux, établissements scolaires et garderies, usines et autres installations industrielles. Ces installations sont connues sous le nom de centrales de cogénération. Habituellement, les centrales de cogénération sont plus efficaces que les centrales produisant uniquement de l'électricité, appelées centrales à condensation.

Il n'est pas toujours pratique d'acheminer de l'eau chaude vers des ensembles résidentiels depuis une centrale de cogénération. Dans ce cas, une chaufferie est construite, laquelle utilise du combustible pour chauffer l'eau destinée aux systèmes de chauffage des bâtiments locaux.

L'utilisation des combustibles fossiles s'est développée avec la révolution industrielle qui a débuté à la fin des années 1700 en Angleterre. Pendant plusieurs milliers d'années auparavant, le bois, l'énergie solaire, le vent et l'eau étaient les sources d'énergie les plus communes, bien que les combustibles fossiles aient déjà été utilisés à certains endroits.

En 2019, les combustibles fossiles dominaient et représentaient 80,9 % de toute l'approvisionnement en énergie primaire dans le monde et leur utilisation était la suivante : 30,9 % pour le pétrole, 26,8 % pour le charbon et 23,2 % pour le gaz naturel (Fig. 3.1.5).

Figure 3.1.5 Approvisionnement mondial en énergie primaire en 2019 et 1973



Autre : sources renouvelables tels que l'éolien, le solaire, la géothermie, la chaleur de faible qualité, etc.

Il y a deux inconvénients majeurs à utiliser des combustibles fossiles. Premièrement, ils ne sont pas inépuisables, et les réserves mondiales s'appauvrissent, notamment les réserves de pétrole et de gaz. Deuxièmement, la combustion de gaz naturel, de pétrole, et plus particulièrement de charbon, émet d'importantes quantités de polluants et de gaz à effet de serre, dont l'accumulation dans l'atmosphère augmente l'effet de serre. Cela entraîne une augmentation de la température mondiale et d'autres changements climatiques, et peut nuire au climat, à l'environnement et à la santé humaine.

Quand les gens ont-ils commencé à utiliser des combustibles fossiles ?

La mine de charbon la plus ancienne du monde a été mise en exploitation en Hollande en 1113. Toutefois, certains éléments indiquent que les gens utilisaient le charbon, le lignite et la tourbe comme sources d'énergie bien avant cette date.

Au Moyen-Âge, le charbon était déjà exploité dans de nombreuses régions d'Europe. Moins cher que le bois, celui-ci s'est imposé progressivement dans la vie quotidienne, y compris dans celle des familles pauvres. Cependant, les maisons à l'époque n'étant pas équipées de cheminées, les pièces se remplissaient d'une fumée âcre, ce qui rendait la respiration difficile.

La consommation de charbon a considérablement augmenté au début de la révolution industrielle. Au XIX^{e} siècle, 700 millions de tonnes de charbon étaient extraites chaque année. Les gens se sont ensuite tournés vers le pétrole.

Le pétrole brut était connu des hommes depuis l'antiquité. Néanmoins, celui-ci n'a commencé à être utilisé comme combustible qu'au milieu du XIX^{e} siècle, après que le chimiste américain Benjamin Silliman a découvert que du kérosène pouvait être issu du pétrole brut. Le boom pétrolier qui s'ensuivit a également été stimulé par une nouvelle méthode d'extraction du pétrole, à savoir le forage plutôt que le simple aménagement de puits.

L'utilisation du gaz naturel ne s'est généralisée qu'au XX^{e} siècle.

Les calculs effectués par les scientifiques ont démontré que la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'énergie augmentait l'effet de serre. Pour le bien du climat, l'humanité doit donc réduire sa consommation d'hydrocarbures et utiliser des sources d'énergies plus respectueuses du climat.

Figure 3.1.6 Émissions de gaz à effet de serre issues de l'utilisation de divers hydrocarbures

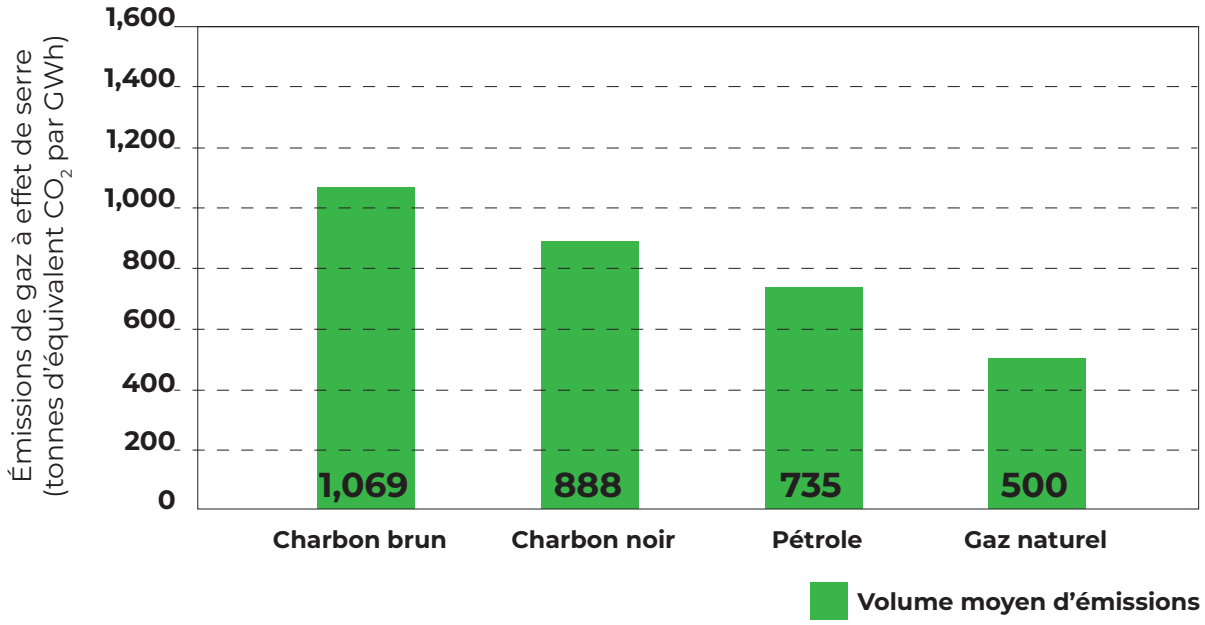


Tableau 3.1

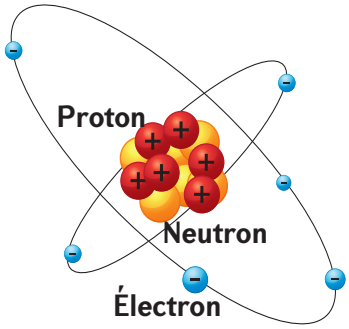
Émissions moyennes de polluants dans l'atmosphère par les centrales utilisant divers combustibles fossiles dans l'Union européenne (grammes/gigajoule)

Type de combustible fossile	Poussière	Monoxyde de carbone (CO)	Oxyde nitreux (NO_x)	Dioxyde de soufre (SO_2)
Charbon brun	3,254	89	183	1,361
Charbon noir	1,203	89	292	765
Pétrole	16	16	195	1,350
Le gaz naturel	0.1	15	93	1

3.1.4 L'énergie nucléaire

Les centrales nucléaires ne produisent quasiment aucune émission de gaz à effet de serre. Pourraient-elles être la solution au problème du changement climatique ? Les scientifiques ont parcouru un long chemin avant de rendre possible l'utilisation de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité pour l'industrie et les ménages. Premièrement, ils ont découvert que toutes les substances sont constituées de nombreuses particules similaires, appelées molécules. Ensuite, on a découvert que les molécules elles-mêmes sont construites à partir d'un ensemble d'atomes. Différents types d'atomes étaient appelés « éléments chimiques ». Ils étaient numérotés et répertoriés dans le tableau périodique de Mendeleïev.

Dans certaines conditions, les molécules de diverses substances peuvent se décomposer au sein de leurs atomes et former les molécules de nouvelles substances au cours d'un processus dit de « réaction chimique ». Au cours d'une réaction chimique, l'énergie qui maintient les atomes ensemble est libérée. Les nouveaux composés peuvent exiger davantage ou moins d'énergie, de sorte que la réaction chimique pourrait donner lieu à l'absorption d'énergie provenant de l'espace qui l'entoure ou à la libération d'énergie dans l'espace. La combustion de combustibles fossiles est une réaction chimique qui produit de la chaleur.



Cependant, que se passerait-il si la réaction ne se produisait pas au niveau de la structure de la molécule, mais de celle de l'atome ? Les scientifiques ont découvert que l'atome était également composé de particules : il possède un noyau composé de protons et de neutrons soudés les uns aux autres, autour duquel gravitent des électrons. Le noyau de certains éléments chimiques peut éclater. Cela produit, dans un premier temps, une grande quantité d'énergie thermique (qui peut être collectée et exploitée), puis dans un second temps des particules spéciales appelées radiations. Ce phénomène est appelé la « désintégration radioactive » ou « radioactivité ».

La radioactivité est un élément naturel de notre planète. En moyenne, selon les données de l'Agence internationale de l'énergie atomique, la quantité annuelle mondiale de rayonnement de fond naturel par individu est d'environ 2,4 millisieverts (mSv) par an. Des doses de radiation si peu élevées sont inoffensives et même nécessaires pour les hommes et l'ensemble du milieu naturel. Cependant, un taux de radiation plus élevé pourrait devenir mortel !

.

En 1975, des experts aux États Unis ont pour la première fois tenté de calculer la probabilité d'accidents graves dans les centrales nucléaires. Ils sont parvenus à la conclusion qu'un tel accident pouvait se produire une fois tous les 10 000 ans. Pourtant, cela ne faisait que quatre ans avant qu'un tel accident ne se produise à la centrale nucléaire de Three Mile Island, près de la ville de Harrisburg aux USA. Les dommages immédiats causés par l'accident ont été estimés à 1 milliard de dollars américains et les dommages indirects à 100 milliards de dollars américains, même si seule une poignée de personnes ont été affectées par la fuite radioactive. Sept ans plus tard, un accident est survenu dans une centrale nucléaire près de la ville de Tchernobyl en ex-Union soviétique, où les scientifiques spécialistes de l'énergie nucléaire avaient également indiqué qu'un tel accident ne se produirait qu'une fois tous les 10 000 ans.

Klaus Taube, ancien directeur de la société allemande Interatom, a déclaré que toute estimation statistique de la probabilité d'un accident entraînant la fusion d'éléments combustibles nucléaires devait être considéré comme une ineptie pseudo-scientifique.

L'homme a appris à contrôler les réactions nucléaires et à utiliser l'énergie qu'elles libèrent. Ce processus est le mécanisme de base utilisé par les centrales. Une centrale nucléaire utilise le processus complexe de désintégration radioactive comme source d'énergie. Une énorme quantité d'énergie peut être extraite d'une faible quantité d'énergie nucléaire sans aucune émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En termes d'incidence sur le climat, l'énergie nucléaire est particulièrement sûre, même s'il ne faut pas oublier que l'extraction d'uranium aux fins d'utilisation dans les centrales nucléaires consomme beaucoup d'énergie et émet d'importantes quantités de gaz à effet de serre.

L'inconvénient majeur des centrales nucléaires est que les nouveaux noyaux, appelés « fils », qui sont formés par la désintégration artificiellement organisée aux fins de production d'énergie, peuvent également être radioactifs. Ils n'ont pas vocation à être utilisés comme combustible, mais ils ne peuvent non plus être replacés dans l'environnement naturel étant donné qu'ils sont dangereux. Les chercheurs ont sérieusement réfléchi aux différents moyens d'éliminer les « déchets radioactifs ». Des projets pilotes sont en cours pour une nouvelle génération de technologie nucléaire dans laquelle les déchets radioactifs des centrales nucléaires existantes sont utilisés comme combustible d'entrée avec des technologies modernes basées sur des réacteurs à neutrons rapides dotés de cycles de combustible avancés. Des recherches prometteuses sont également en cours sur les petits réacteurs nucléaires modulaires qui pourraient fournir de l'énergie directement aux villes. Si ces méthodes avaient parfaitement fonctionné, tel qu'initialement prévu, on aurait effectivement pu dire que l'énergie nucléaire était entièrement sans danger. Toutefois, les questions de santé et de sécurité des centrales nucléaires restent une préoccupation majeure. Les dangers associés à l'utilisation de l'énergie nucléaire, qui continuent d'exister même après la fermeture d'une centrale, ont donné lieu à un débat, encore actuel, à savoir s'il faut développer davantage les centrales nucléaires ou s'il faut les interdire.

L'explosion de la centrale nucléaire de Tchernobyl, le 26 avril 1986, a choqué le monde entier. De nombreuses personnes ont été tuées ou gravement handicapées. Environ 5 millions d'hectares de terres (une superficie énorme comparé à la taille d'un pays comme la Slovaquie) est devenue impropre à l'agriculture. Une zone d'exclusion de 30 km a été créée autour du site de l'accident, tandis que des centaines de petits villages ont été abandonnés et détruits.

De nombreuses années se sont désormais écoulées, et les concepteurs de centrales nucléaires affirment aujourd'hui que les erreurs du passé ne peuvent se reproduire sur les nouveaux équipements inventés, qui comportent des améliorations.

Toutefois, dans le contexte actuel de changement climatique majeur, il est impossible de prédire quel phénomène naturel exceptionnel peut se produire. Lors de la construction des centrales nucléaires au Japon, l'apparition fréquente de séismes dans ce pays a été incontestablement prise en compte. Néanmoins, le 11 mars 2011, un violent séisme, et le tsunami qui en a découlé, ont provoqué au sein d'une centrale nucléaire, la panne de l'ensemble des systèmes et le refroidissement d'urgence du réacteur principal, ce qui a entraîné des explosions thermiques. Une grande quantité de matière radioactive s'est répandue dans la mer et dans l'air, dont les conséquences ont été ressenties par de nombreux pays. Les niveaux de radiation sur le littoral où est implantée la centrale nucléaire de Fukushima-1 étaient encore 100 fois supérieurs aux niveaux normaux trois ans après l'accident. 80 000 personnes ont dû déménager loin de la zone. Malgré l'assurance des autorités japonaises que la situation était stabilisée, davantage de substances radioactives ont contaminé les eaux souterraines situées sous la centrale deux ans après l'accident et leurs concentrations ont augmenté, et une autre fuite des réservoirs d'eau radioactive s'est produite.

L'énergie nucléaire est une énergie puissante, mais elle est également dangereuse. Les dégâts qu'elle peut occasionner en cas de perte de contrôle démontrent qu'elle n'est ni sûre, ni bon marché. Néanmoins, l'énergie nucléaire suscite récemment une attention accrue en raison de la demande croissante d'électricité et des pressions exercées pour réduire les émissions de dioxyde de carbone liées à la production d'électricité.

3.1.5 Les énergies renouvelables

Comme nous l'avons déjà vu, les énergies renouvelables utilisent des processus et des ressources naturels qui sont pratiquement inépuisables ou se renouvellent relativement rapidement et naturellement. Elles comprennent l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, marémotrice et la chaleur de la terre. Tous ces types d'énergies sont souvent appelées énergies « alternatives » ou « vertes » car, contrairement aux hydrocarbures, elles ne portent pas atteinte à l'environnement et au climat. Elles englobent également la biomasse, même si celle-ci est un cas à part, pour diverses raisons.

En 2022, environ 29 % de la production mondiale d'énergie électrique provenait de sources renouvelables. Là où des ressources renouvelables sont disponibles, il est désormais moins coûteux de construire une usine utilisant ces ressources qu'une usine utilisant des combustibles fossiles. En Afrique subsaharienne, par exemple, les pays atteignent leurs divers objectifs en matière d'énergie et de changement climatique grâce aux énergies renouvelables, qui représentent désormais 85 % de la production totale d'électricité. L'expansion massive de l'utilisation des énergies renouvelables laisse présager que les émissions de CO_2 culmineront en 2025 et diminueront par la suite.

Les experts ont préparé différents scénarios pour le développement futur des énergies renouvelables. Dans le scénario le plus favorable, la part des énergies renouvelables dans l'approvisionnement en énergie primaire doit passer de 16 % en 2020 à 77 % en 2050 pour maintenir la hausse des températures en dessous de 1,5 °C. Il est important de noter que 80 % de la réduction des émissions nécessaire pour atteindre cet objectif pourrait provenir d'un triplement de la capacité des énergies renouvelables et d'un doublement des améliorations de l'efficacité énergétique.

Les progrès technologiques, la croissance des marchés et les politiques climatiques ont contribué à réduire le coût des énergies renouvelables et à favoriser leur expansion mondiale. Et ce, malgré la hausse des coûts des matériaux et des équipements. La Chine a été le principal moteur de la baisse mondiale des coûts du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre en raison de la taille de son marché.

Figure 3.1.7 Exemples d'usine de bioénergie et de centrale solaire

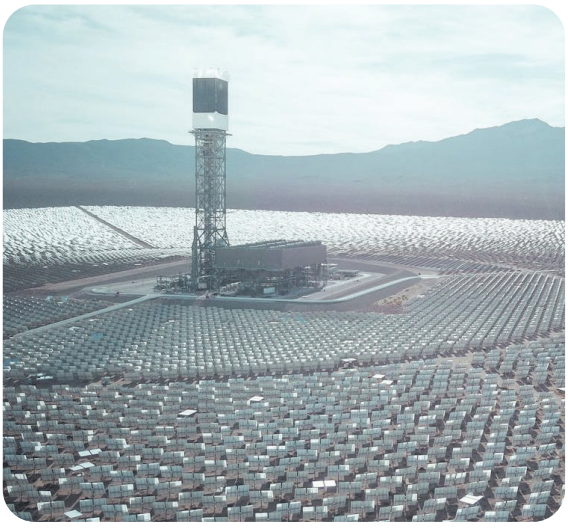


Tableau 3.2 **Comparaison des coûts de différentes technologies d'énergie renouvelable**

	Coûts totaux d'installation (2022 USD/KW)			Facteur de capacité (%)			Coût actualisé de l'électricité (2022 USD/KW)		
	2010	2022	Pourcentage de changement	2010	2022	Pourcentage de changement	2010	2022	Pourcentage de changement
Bioénergie	2 904	2 904	-26 %	72	72	1 %	0,082	0,061	-25 %
Géothermique	2 904	3 478	20 %	87	85	-2 %	0,053	0,056	6 %
Hydroélectricité	1 407	2 881	105 %	44	46	4 %	0,042	0,061	47 %
Solaire photovoltaïque	5 124	876	-83 %	14	17	23 %	0,445	0,049	-89 %
Fournisseur de services de chiffrement	10 082	4 274	-58 %	30	36	19 %	0,380	0,118	-69 %
Éolien Terrestre	2 179	1 274	-42 %	27	37	35 %	0,107	0,033	-69 %
Éolien offshore	5 217	3 461	-34 %	38	42	10 %	0,197	0,081	-59 %

Note sur les termes : coût total installé : coût de construction d'une centrale électrique ; facteur de capacité : durée globale de fonctionnement de l'installation ; coût actualisé de l'électricité : coût moyen de production d'électricité pour un générateur tout au long de sa durée de vie ; CSP : énergie solaire concentrée ; solaire PV : solaire photovoltaïque.

Le soleil

Le soleil est la source d'énergie fournie par la nature elle-même pour la création de la vie sur Terre. Pourquoi donc ne pas chercher un moyen d'utiliser directement l'énergie solaire ? Le soleil de midi chauffe chaque mètre carré de la planète avec une capacité d'environ un mégawatt.

Toute pièce munie d'une fenêtre devient plus chaude lorsque le soleil y entre. Si le soleil passe à travers vos fenêtres, mais qu'il fait frais à l'intérieur de la maison, ouvrez les rideaux et ôtez la poussière des vitres, ainsi le soleil chauffera davantage votre pièce. Autrefois dans les villages européens, les gens utilisaient des volets en bois sur les fenêtres. Le jour, la fenêtre était ouverte pour laisser entrer la lumière, et la nuit elle était fermée au moyen de volets pour conserver la chaleur recueillie à l'intérieur de la maison.

Grâce aux progrès de la science, l'homme a appris d'autres techniques lui permettant de mieux « capter le soleil ». Il existe deux principales façons d'utiliser l'énergie solaire.

Unités de mesure de l'électricité

Watt est une unité de puissance. Un watt est défini comme un joule par seconde (1 J/s), représentant le taux de transfert d'énergie ou de conversion d'un joule d'énergie par seconde.

- **1 watt (W) :** la puissance de l'émetteur d'un téléphone portable standard.
- **1 kilowatt (kW, 1 000 W) :** puissance d'un petit radiateur, équivalent approximativement au chauffage d'un mètre carré de terre par le soleil de midi.
- **1 megawatt (MW 1 000 kW) :** les locomotives ont une puissance moyenne de 3 à 10 mégawatts.
- **1 gigawatt (GW, 1 000 MW) :** la puissance des plus grandes centrales électriques du monde est généralement mesurée en gigawatts.
- **1 terawatt (TW, 1 000 GW) :** la puissance de crête de la foudre.

Les capteurs solaires captent l'énergie solaire. De l'eau circule dans les tubes à l'intérieur du capteur et est chauffée (de l'air ou de l'antigel sont parfois utilisés à la place de l'eau). Ces capteurs peuvent être utilisés pour chauffer des immeubles et pour fournir de l'eau chaude.

Les cellules photovoltaïques sont une autre façon souvent utilisée de capter et d'emmagasiner l'énergie solaire. Les cellules photovoltaïques transforment la lumière du soleil en énergie électrique. Nous connaissons tous les calculatrices qui utilisent les cellules photovoltaïques et les lanternes de jardin qui collectent de l'énergie durant la journée et produisent de la lumière la nuit. Les grandes centrales à énergie solaire, appelées « fermes solaires », fonctionnent exactement de la même façon.

Les capteurs solaires sont installés sur les toits des maisons avec un angle égal à la latitude du lieu où ils sont employés.

Les cellules photovoltaïques peuvent également être utilisées pour alimenter divers moyens de transport : bateaux, voitures et même avions ! En Italie et au Japon, des cellules photovoltaïques sont installées sur le toit des trains afin de produire de l'électricité pour la climatisation, l'éclairage et les systèmes d'alarme.

L'énergie solaire a pour principaux avantages d'être librement accessible, inépuisable et sûre. Les installations solaires n'émettent aucun gaz à effet de serre ou polluant, par conséquent cette méthode de production d'énergie est sans danger pour le climat.

L'énergie solaire : eau chaude plus électricité

L'utilisation de la chaleur du soleil pour produire de l'énergie est, depuis des années, une pratique courante dans les pays chauds. Dans ces pays, les toits des maisons sont souvent équipés de réservoirs d'eau qui sont chauffés par la lumière du soleil en vue d'être utilisés pour les besoins quotidiens.

En Israël, chaque bâtiment est équipé de panneaux solaires pour la production d'eau chaude. La ville de Fribourg, en Allemagne, est une vitrine du potentiel qu'offre l'énergie solaire, laquelle est utilisée pour répondre aux besoins énergétiques de quartiers entiers. Des expériences semblables sont de plus en plus fréquemment menées partout dans le monde.

Les inconvénients de l'énergie solaire sont sa forte dépendance aux conditions météorologiques et à l'heure de la journée, ainsi que les coûts de construction élevés résultant de l'utilisation d'éléments rares dans les panneaux solaires. Cependant, de nouvelles technologies permettent progressivement de réduire le coût des installations solaires et d'élargir la sphère de leur utilisation. Des données récentes montrent que le coût de l'énergie renouvelable a chuté de 80 % depuis 2010, conduisant à une utilisation rapide de l'énergie solaire pour la production d'électricité dans le monde entier. Cependant l'élimination des cellules solaires usagées comporte certains problèmes, celles-ci contenant certaines substances toxiques. Le recyclage des panneaux solaires est un marché qui n'a pas encore pris figure, et les panneaux ont une durée de vie utile de plusieurs décennies. Autre inconvénient : la consommation énergétique et les grandes quantités d'eau propre utilisées pour la production des panneaux solaires. Les concepteurs travaillent actuellement à l'élaboration de nouvelles cellules solaires plus respectueuses de l'environnement, tandis que les fabricants doivent, pour leur part, développer des systèmes pour l'élimination et le recyclage des panneaux usagés.

Quelle est la taille des plus grandes centrales solaires du monde ? Qu'en est-il de l'énergie solaire après le coucher du soleil ?

La plus grande centrale solaire est la centrale photovoltaïque de Talatan en Chine, avec un parc solaire qui s'étend sur 609,6 km^2. La capacité de la centrale photovoltaïque de Talatan reflète l'ampleur de la centrale : un gargantuesque de 9 GW, qui contribue à une production annuelle moyenne de 9 600 watts. Mais la centrale photovoltaïque de Talatan n'est pas seulement l'un des principaux exemples mondiaux de ce à quoi ressemble l'avenir des énergies renouvelables : c'est une étude de cas sur la façon dont les parcs solaires peuvent transformer les perspectives géographiques et économiques d'une région pour le bénéfice de la population.

La deuxième plus grande centrale solaire thermique au monde en 2022 est le parc solaire de Bhadla, dans le district de Jodhpur au Rajasthan, en Inde. Le parc solaire de Bhadla est une centrale solaire photovoltaïque de 2,25 GW et le plus grand parc solaire au monde, couvrant près de 14 000 acres de terrain. Sa construction a coûté environ 1,4 milliard de dollars. Quels sont certains de ses avantages ? Cela contribue à réduire la dépendance de l'Inde à l'égard des combustibles fossiles importés. Dans les zones rurales, l'énergie solaire constitue une source d'énergie intérieure beaucoup plus saine et plus sûre pour l'éclairage d'intérieur que le kérosène. De plus, les centrales solaires comme le parc solaire de Bhadla stimulent la croissance économique et la création d'emplois dans les zones environnantes.

La centrale électrique de Solana est située à 110 km au sud-est de la ville de Phoenix en Arizona, aux États-Unis. Elle peut générer jusqu'à 280 MW d'énergie à partir des rayons du soleil et est l'une des centrales solaires les plus puissantes au monde utilisant la technologie des miroirs paraboliques. Mais ce qui rend le complexe spécial, ce n'est pas sa taille, mais sa capacité à continuer à produire de l'électricité pendant six heures après le coucher du soleil grâce à des réservoirs spéciaux qui retiennent la chaleur. Il s'agit d'une caractéristique précieuse, car la période qui suit le coucher du soleil correspond à la période de pointe de consommation électrique dans la région.

Nombre d'experts considèrent l'énergie solaire comme l'énergie du futur et comme l'une des principales alternatives aux énergies hydrocarbures traditionnelles. Les gouvernements de nombreux pays soutiennent le développement de l'énergie solaire, tandis que certaines sociétés privées investissent beaucoup d'argent dans la construction de centrales solaires. Bien qu'elle ne soit pas réputée pour être particulièrement ensoleillée, l'Allemagne s'affirme désormais comme chef de file mondial en matière de développement de l'énergie solaire. Les autres pays chefs de file sont l'Espagne, la Suède, le Costa Rica, l'Islande, l'Italie, la France, le Japon, le Kenya, le Maroc, la Nouvelle-Zélande, la Norvège, l'Uruguay et le Royaume-Uni. Cette liste montre que l'énergie solaire devient de plus en plus importante pour les pays développés et en développement ainsi que pour les économies émergentes. Il est important de noter que l'énergie solaire contribue à fournir aux villages éloignés des pays en développement qui ne sont pas connectés au réseau des services énergétiques modernes, une énergie bon marché.

Le vent

Le vent est une autre source d'énergie renouvelable couramment utilisée. Le principe de l'énergie éolienne est de transformer l'énergie mécanique (l'énergie du mouvement) en énergie électrique. Les éoliennes miniatures et les jouets actionnés par le vent sont amusants lorsqu'il s'agit de jouer avec, néanmoins la construction de grandes éoliennes et leur implantation dans un endroit venté, grâce à la rotation des turbines, permet de produire de l'électricité à des fins d'usage public.

Les moulins à vent sont utilisés depuis l'Antiquité, mais sont devenus particulièrement populaires en Europe durant le Moyen-Âge. Longtemps, les moulins à vent et les moulins à eau ont été les seules machines connues de l'homme. Les moulins à vent étaient principalement utilisés pour moudre du maïs afin de le transformer en farine, pour transformer le bois ou pour l'irrigation. Aux Pays-Bas, les moulins à vent étaient utilisés pour pomper l'eau des terres gagnées sur la mer afin que celles-ci puissent être utilisées pour l'agriculture.

Les éoliennes modernes appliquent un principe analogue à celui des moulins à vent.

Les éoliennes sont généralement implantées dans des régions côtières, où le vent est constant, et il est récemment devenu possible de construire de telles installations sur terre comme en mer. Les « parcs éoliens offshore » sont désormais construits à 10-12 km ou plus de la côte. Les éoliennes reposent sur des fondations formées de piliers ancrés dans le fond marin à 30 m de profondeur. Les technologies les plus récentes permettent de construire des éoliennes installées sur plateformes flottantes.

Le parc éolien offshore le plus grand du monde

Deux projets éoliens offshore au large de la côte est de l'Angleterre comptent désormais parmi les plus grands projets en exploitation au monde. Ils comprennent le Hornsea 2 de 1,32 GW et le Hornsea 1 de 1,2 GW, qui constituent le plus grand parc éolien offshore en activité au monde. Hornsea 2 s'étend sur 462 km^2 et peut alimenter plus de 1,3 million de foyers. Ensemble, Hornsea 1 et 2 sont capables d'alimenter 2,5 millions de foyers. Le projet Hornsea 3, d'une capacité de 2,8 GW, devrait être opérationnel dans les prochaines années. Un autre exemple est celui du Grand Changhua, avec une capacité totale de 900 MW, ce qui en fait le plus grand et le premier parc éolien farshore de Taiwan. Ce parc éolien offshore soutient de manière significative le développement rapide d'énergies renouvelables à Taiwan et lui fournit l'énergie verte indispensable pour atteindre son objectif de zéro émission nette.

Un parc éolien de grande taille peut être composé de plusieurs centaines d'éoliennes s'étendant sur un vaste territoire (jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres carrés). Les éoliennes sont reliées au réseau électrique national et sont en mesure d'acheminer l'électricité sur de longues distances. Des parcs éoliens de taille plus modeste ou des éoliennes autonomes peuvent être utilisé(e)s pour approvisionner en électricité des régions reculées ou pour alimenter de petites installations.

En 2022, l'énergie éolienne a fourni plus de 2 100 TWh d'électricité, soit plus de 7 % de la production mondiale d'électricité, et plus que toutes les autres sources d'énergie renouvelables non traditionnelles réunies. Il s'agit d'une source d'énergie en croissance rapide à mesure que de nouvelles technologies plus avancées sont inventées, qui permettent d'utiliser l'énergie éolienne plus efficacement.

La part de l'éolien et du solaire est en constante augmentation (+1,5 % en 2022), pour atteindre 12,2 % du mix énergétique destiné à la production d'électricité en 2022. Les experts de l'Agence internationale de l'énergie prédisent que l'énergie éolienne et solaire connaîtra une croissance encore plus rapide au cours de la décennie en cours et ensemble, pourraient produire jusqu'à 18 % de l'électricité mondiale d'ici 2026. Outre l'hydroélectricité traditionnelle, la part de l'énergie éolienne et solaire (également appelées énergies renouvelables variables) atteindra 37 % d'ici cette année-là.

L'énergie éolienne joue déjà un rôle important dans certains pays européens. Le Danemark est un leader mondial dans la production d'énergie solaire et éolienne. En 2023, l'énergie éolienne représentait plus de 57 % de la production d'électricité du pays, par rapport à 1994, où le charbon représentait 83 % de la production d'électricité.

Figure 3.1.7 Parcs éoliens au Kansas, USA (ci-dessus) et en Autriche (ci-dessous)

L'eau

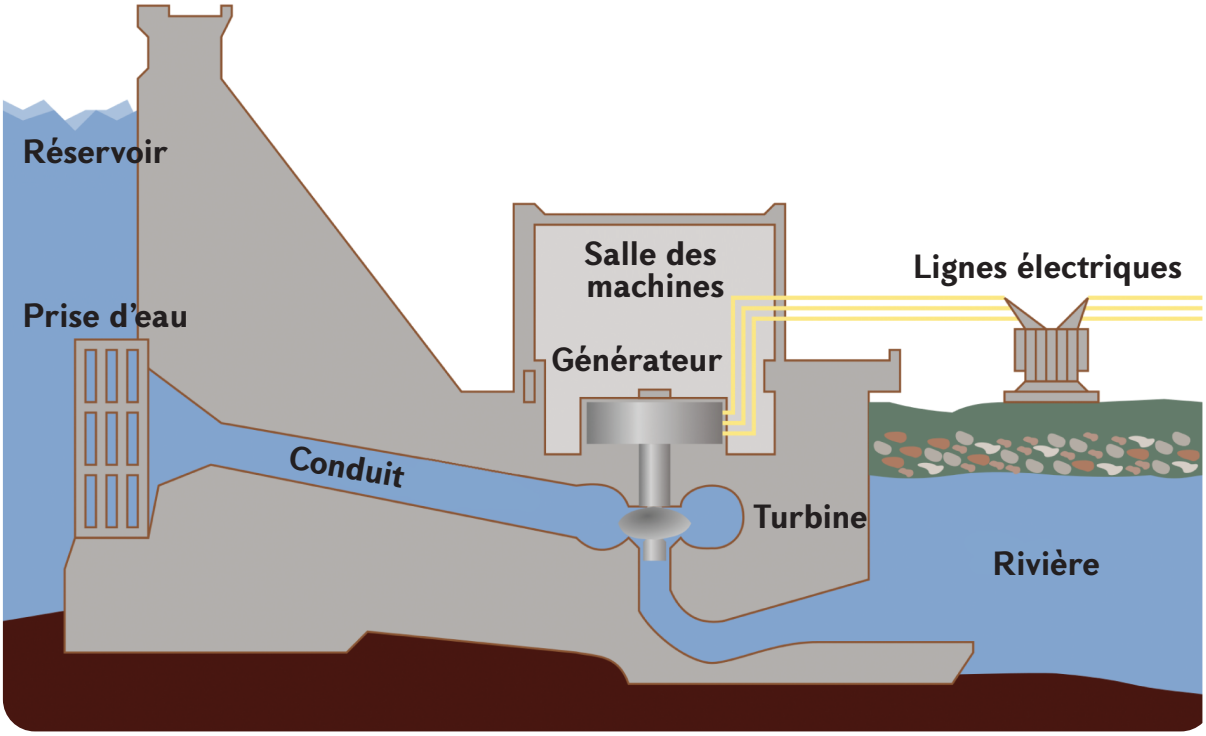
L'énergie de l'eau en mouvement peut être exploitée de nombreuses façons.

L'utilisation la plus courante de l'eau pour créer de l'énergie est l'hydroélectricité, qui fonctionne de la même façon que les anciens moulins à eau ; le flux de la rivière entraîne la rotation d'une turbine, ce qui permet de produire de l'électricité.

Cela peut sembler simple, mais l'hydroélectricité a certains inconvénients. Pour créer une centrale hydroélectrique puissante et efficace, la construction d'un haut barrage est nécessaire afin que toute la puissance de la rivière puisse être canalisée pour assurer la rotation des pâles des turbines. La construction d'un tel barrage perturbe l'équilibre naturel de la rivière : elle peut modifier son microclimat, et détruire ou porter atteinte aux animaux et plantes qui y vivent. La construction d'une centrale hydroélectrique doit donc être minutieusement pensée, en prêtant particulièrement attention à l'équilibre environnemental.

L'entretien des grands barrages requiert également une attention constante : en cas d'accident entraînant la rupture du barrage, l'eau qui sera libérée se précipitera vers la vallée fluviale, emportant tout sur son passage, et inondera la vallée sur plusieurs kilomètres en aval. À titre d'exemple, la rupture du barrage hydroélectrique de Bantsao en Chine, survenue en 1975, a fait plus de 200 000 morts officieusement (26 000 selon les sources officielles).

Figure 3.1.8 Schéma d'une centrale hydroélectrique et d'un barrage



Les installations hydroélectriques de petite taille peuvent fonctionner sans barrage (Fig. 3.1.9). Elles sont construites sur de petites rivières ou même des ruisseaux, et emmagasinent l'énergie dans une batterie. Elles ont une puissance limitée, mais suffisent à satisfaire les besoins d'une petite exploitation agricole ou les services essentiels d'une réserve naturelle située le long de la rivière.

L'hydroélectricité est plus sûre pour le climat que la production d'énergie par des centrales thermiques, et le coût de la production d'électricité dans une centrale hydroélectrique est moitié moins élevé que celui d'une centrale thermique. En conséquence, de nombreux pays tentent de maximiser le potentiel de leurs rivières pour produire de l'énergie, et dans certains pays, l'hydroélectricité représente 90 % voire 100 % de la production d'électricité (Paraguay, Tadjikistan, Uruguay, Ouganda, Zambie, Namibie, Cameroun et Brésil).

La Chine est fortement engagée dans l'énergie hydroélectrique : la moitié des petites centrales hydroélectriques du monde y ont été construites, de même que la plus grande centrale hydroélectrique du monde – la centrale des Trois-Gorges sur le fleuve Yang-Tsé, d'une capacité de 22,5 GW (Fig. 3.1.10). Une centrale encore plus importante, baptisée Grand Inga, d'une capacité de 39 GW doit être construite sur le fleuve Congo, en République démocratique du Congo, Afrique. Le Brésil et le Canada sont également d'importants producteurs d'hydroélectricité.

Figure 3.1.9

Petite centrale hydroélectrique sur la rivière Kokra (Slovénie)

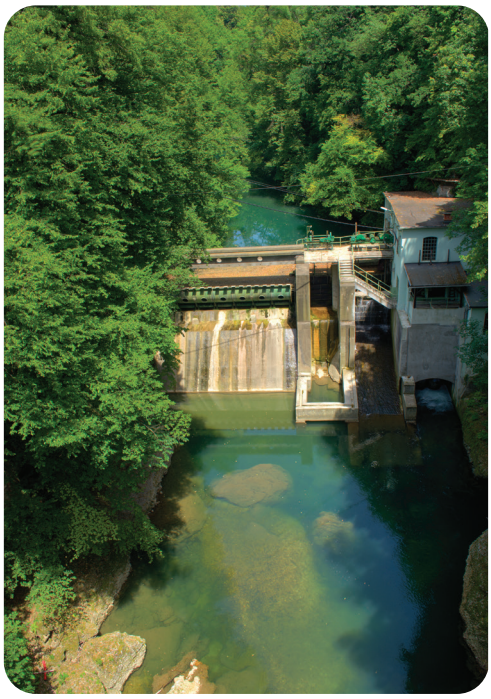


Figure 3.1.10

Centrale hydroélectrique des Trois-Gorges, Chine

Figure 3.1.11

Barrage Yacyreta sur le fleuve Parana, Paraguay, Argentine

Les centrales houlomotrices exploitent l'énergie des vagues de l'océan, soit les oscillations à la surface de l'eau. Ainsi, la puissance bouillonnante de l'océan, tant redoutée par les navigateurs auparavant, peut être utilisée à notre avantage. La puissance des vagues est des dizaines de fois plus grande que celle du vent, si elle peut être exploitée.

Les centrales marémotrices exploitent le phénomène extraordinaire des marées. L'ensemble des planètes, étoiles et autres corps célestes sont liés par la gravité et influent les uns sur les autres. La Terre tourne autour du Soleil et autour de son propre axe, la Lune tourne autour de la Terre, et les positions respectives du Soleil, de la Terre et de la Lune changent constamment. Cela influe sur l'océan.

Un barrage est construit à un endroit de la baie où les marées sont fortes. Dans un premier temps, il empêche l'eau montante de pénétrer dans la baie, jusqu'à ce que le niveau de la marée soit proche de son maximal. Une vanne s'ouvre ensuite et l'eau de mer se précipite à l'intérieur avec vigueur, ce qui actionne un rotor. Lorsque le niveau d'eau des deux côtés du barrage est égalisé, la vanne est refermée. Quand vient le temps de la marée basse, une fois que l'océan a battu en retraite, l'eau emprisonnée fait pression pour quitter la baie et est relâchée par le biais de la vanne, ce qui actionne une nouvelle fois le rotor.

Plusieurs expériences utilisant l'énergie des vagues ont été tentées depuis la fin du XVIII^{e} siècle : le premier brevet pour un moulin actionné par la puissance des vagues a été déposé en 1799. Mais beaucoup de temps s'est écoulé avant que cette forme d'énergie puisse être utilisée à grande échelle. Il existe également des centrales marémotrices qui dépendent des forces gravitationnelles, contrairement aux centrales houlomotrices qui dépendent du vent et des vagues.

La première centrale houlomotrice à grande échelle a été inaugurée en 2008 dans la région d'Agudoura au Portugal, à cinq kilomètres de la côte. La station a une capacité de 2,25 MW.

Une autre grande centrale houlomotrice de capacité comparable est la ferme houlomotrice Sotenäs à Kungshamn, en Suède. La centrale se compose de 36 convertisseurs d'énergie houlomotrice (WEC), d'une capacité installée totale de près de trois MW.

La centrale marémotrice de la Rance en Bretagne, en France, est la plus ancienne installation marémotrice au monde. Depuis 1967, c'était également la plus grande centrale marémotrice en termes de capacité installée jusqu'à ce que la centrale marémotrice du lac Sihwa en République de Corée du Sud la dépasse en 2011. La centrale marémotrice de la Rance dispose de 24 turbines qui atteignent une puissance maximale de 240 MW et une moyenne de 57 MW, soit un facteur de capacité d'environ 24 %. Avec une production annuelle d'environ 500 GWh, elle fournit 0,12 % de l'électricité française. Le coût de production d'électricité est estimé à 0,12 €/kWh. La différence de niveau entre marée haute et marée basse dans cette partie de la France est en moyenne de huit mètres et peut atteindre 12 mètres.

L'énergie géothermique

L'énergie géothermique utilise la chaleur produite par la terre. On ne peut la qualifier de « renouvelable » à proprement parler, mais les réserves de chaleur que renferment les profondeurs de notre planète sont immenses. La chaleur que renferme la terre est visible dans les zones d'activité volcanique, où les eaux chaudes souterraines remontent parfois par les fissures formées à la surface de la terre et jaillissent occasionnellement sous forme de jets d'eau et de vapeur appelés « geysers ».

Un forage peut être réalisé pour atteindre les lacs d'eau chaude souterrains, dont l'eau peut être utilisée à des fins de chauffage ou de production d'électricité, et également d'approvisionnement en eau chaude (si la composition chimique de l'eau est adaptée). La difficulté particulière associée à l'énergie hydrothermique réside dans le fait que les eaux usées doivent être renvoyées dans le sol, car elles contiennent souvent des produits chimiques qui pourraient être nocifs s'ils était relâchés dans les rivières et les lacs. Autre problème, l'utilisation de l'eau provenant des lacs souterrains laisse des vides, qui pourraient entraîner un affaissement de terrain.

Une autre possibilité consiste à pomper l'eau de surface, par l'intermédiaire d'un forage, dans les zones souterraines chaudes, où celle-ci est chauffée par une « chaudière naturelle » jusqu'à ébullition puis retourne à la surface, via un forage adjacent, sous forme de vapeur. C'est ce que l'on appelle l'énergie pétrothermale. Plusieurs projets pétrothermaux ont été développés aux USA, en Australie, au Japon, en Allemagne et en France

Le champ géothermique le plus grand et le plus puissant au monde se trouve au nord de San Francisco, aux États-Unis. Baptisé The Geysers, il se compose de 22 centrales géothermiques d'une capacité totale installée de 1 517 MW.

Aux Philippines et en Islande, deux pays possédant des volcans encore actifs, les centrales géothermiques produisent un quart de l'énergie électrique consommée. La Nouvelle-Zélande, l'Indonésie, le Japon et l'Italie ont également très largement recours à l'énergie géothermique.

Figure 3.1.12

Conduite d'une centrale géothermique

Chaleur à faible température

Les réfrigérateurs s'appuient sur plusieurs principes pour leur bon fonctionnement. Le principe est le suivant : un agent de refroidissement liquide (le réfrigérant) absorbe la chaleur à l'intérieur du réfrigérateur, à la suite de quoi un compresseur aspire et comprime l'agent de refroidissement sous la pression, à l'extérieur du réfrigérateur, de sorte que (conformément aux lois de la physique), la chaleur absorbée soit rejetée dans l'air de la pièce où est installé le réfrigérateur.

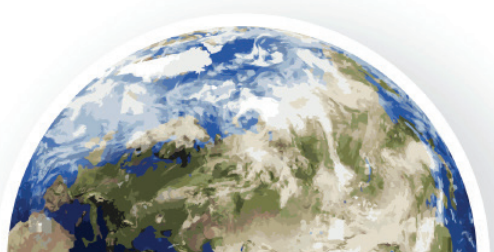
C'est la raison pour laquelle lorsque nous touchons la paroi arrière d'un réfrigérateur, celle-ci est chaude. C'est également pour cette raison qu'un réfrigérateur doit être éloigné des appareils de chauffage et ne pas être directement exposé au soleil, car il est important que la chaleur qu'il émet se dissipe rapidement dans l'air ambiant et ne soit pas maintenue sur les parois extérieures du réfrigérateur.

Un réfrigérateur a pour but de conserver le froid et de se départir de la chaleur, mais l'opération peut également être effectuée en sens inverse, afin de conserver la chaleur et de se départir du froid. L'appareil qui permet de faire cela s'appelle la pompe à chaleur.

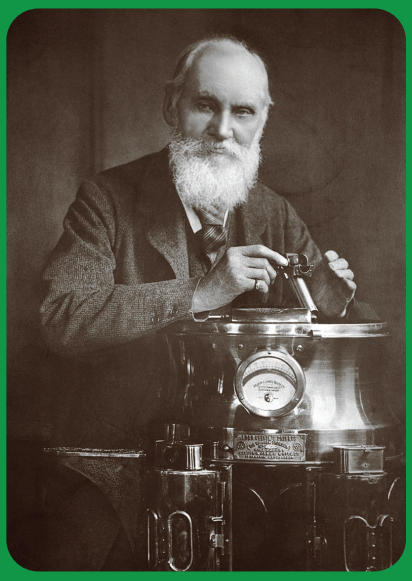
Les pompes à chaleur sont en mesure d'absorber la chaleur de liquides, d'air ou d'autres substances faiblement chauffées. Elles peuvent également « capter » la chaleur de la terre à faible profondeur. En hiver, si vous faites passer l'air chaud provenant de votre appartement ou l'eau chaude vidangée du bain par une pompe à chaleur, une part substantielle de la chaleur sortante peut être restituée dans votre appartement. Cependant, une pompe à chaleur ne peut chauffer de l'eau à une température très élevée. La limite supérieure est généralement de 50 ou 60 °C, ce qui en fait un complément et non une source d'énergie autonome pour réduire la consommation de combustibles pour le chauffage.

Néanmoins, les scientifiques considèrent les pompes à chaleur comme une technologie clé dans pratiquement tous les scénarios futurs menant à zéro émission en 2050, car elles utilisent non seulement des énergies renouvelables, mais offrent des gains d'efficacité deux à quatre fois supérieurs à ceux des systèmes de chauffage conventionnels. C'est pourquoi le nombre de pompes à chaleur installées augmente rapidement et devrait être multiplié par dix d'ici 2050.

Rien qu'en Europe, les ventes de pompes à chaleur ont grimpé en flèche grâce aux améliorations technologiques et à la réduction des coûts. La baisse rapide des coûts de production des systèmes photovoltaïques influence également le marché du chauffage : l'utilisation de l'électricité autoproduite en combinaison avec un système de pompe à chaleur offre aux bâtiments une source d'énergie à faible coût.



Le concept des pompes à chaleur a été développé au XIX^{e} siècle par le scientifique britannique William Thomson (Lord Kelvin) et a été amélioré par l'autrichien Peter Ritter von Rittinger. Mais l'application pratique la plus importante des pompes à chaleur n'a été développée qu'au XX^{e} siècle. Un inventeur, R. Weber, qui effectuait des expériences avec une chambre de congélation, toucha le tuyau chaud de la chambre et commença à se demander comment utiliser cette chaleur. Il a pensé à utiliser le tuyau chaud pour chauffer l'eau, mais cela produisait trop d'eau chaude, alors il a plutôt fabriqué un serpentin pour réchauffer l'air de la maison. Weber a alors trouvé un moyen de pomper la chaleur du sol. Bientôt, il put vendre le vieux brûleur à charbon sur lequel sa famille comptait, car il n'était plus nécessaire.



Le physicien britannique,William Thomson (Lord Kelvin).

Biomasse

Les plantes vivantes qui nous entourent ont recours à la photosynthèse pour accumuler dans leur organisme l'énergie du soleil. Un feu de camp ou feu de cheminée nous réchauffe, car tout arbre abattu pour en faire du bois de chauffage a passé des années à capturer l'énergie du soleil et à recueillir le dioxyde de carbone de l'air. Les arbres ont travaillé pour nous en accumulant de l'énergie lorsqu'ils étaient vivants, et nous transmettent finalement cette énergie lorsqu'ils brûlent dans le feu.

Il faut à la nature plusieurs centaines de millions d'années pour créer des combustibles fossiles, par conséquent, à la vitesse où nous les utilisons, ils ne pourront être remplacés. Mais le combustible biomasse peut être facilement remplacé : si nous abattons un vieil arbre pour en faire un combustible, nous pouvons en planter un nouveau à sa place, qui deviendra un nouvel arbre dans quelques décennies. Certaines plantes et cultures agricoles utilisées pour produire du carburant poussent en un été, voire plus rapidement.

Réfléchissons un peu : bon nombre d'entre nous se sont déjà réchauffés ou ont déjà partagés de bons moment assis autour d'un feu de camp, ou à regarder les flammes danser en été lors d'un barbecue, mais combien d'arbres avons-nous planté pour rendre ce bois à la nature ? Il est relativement simple d'abattre des forêts et d'en utiliser le bois. Mais combien de fois de nouveaux arbres sont-ils plantés en remplacement de ceux abattus ? Il est essentiel que nous le fassions !

Les arbres ne sont pas les seuls à pouvoir servir de combustible. Certaines parties des plantes, généralement considérées comme des déchets, font également de bons combustibles. Par exemple, les cosses des cotonniers, la paille de blé et les noyaux de fruits. Au cours de leur vie, les plantes absorbent environ autant de dioxyde de carbone qu'elles en rejettent au moment de leur combustion. Si elles étaient mortes dans le milieu naturel au lieu d'être utilisées comme combustible, à peu près la même quantité de gaz aurait été rejetée progressivement, à mesure qu'elles pourrissaient. La biomasse est considérée comme une source d'énergie relativement sûre, mais elle ne représente pas toujours le bon choix : par exemple, il paraît judicieux d'utiliser les chutes provenant du travail du bois comme combustible, mais si nous abattons des arbres sains pour en faire du bois de chauffage, nous gâchons des ressources naturelles précieuses.

Le biocarburant est un carburant produit à partir de matières premières végétales ou animales, de déchets des organismes ou de déchets organiques industriels, c'est-à-dire de biomasse. La science permet aujourd'hui de fabriquer des biocarburants liquides pour les moteurs à combustion interne (bioéthanol et biodiesel) ainsi que des biocarburants solides (bois de chauffage, briquettes, granules, copeaux de bois, cosses et coquilles) et du carburant gazeux (biogaz).

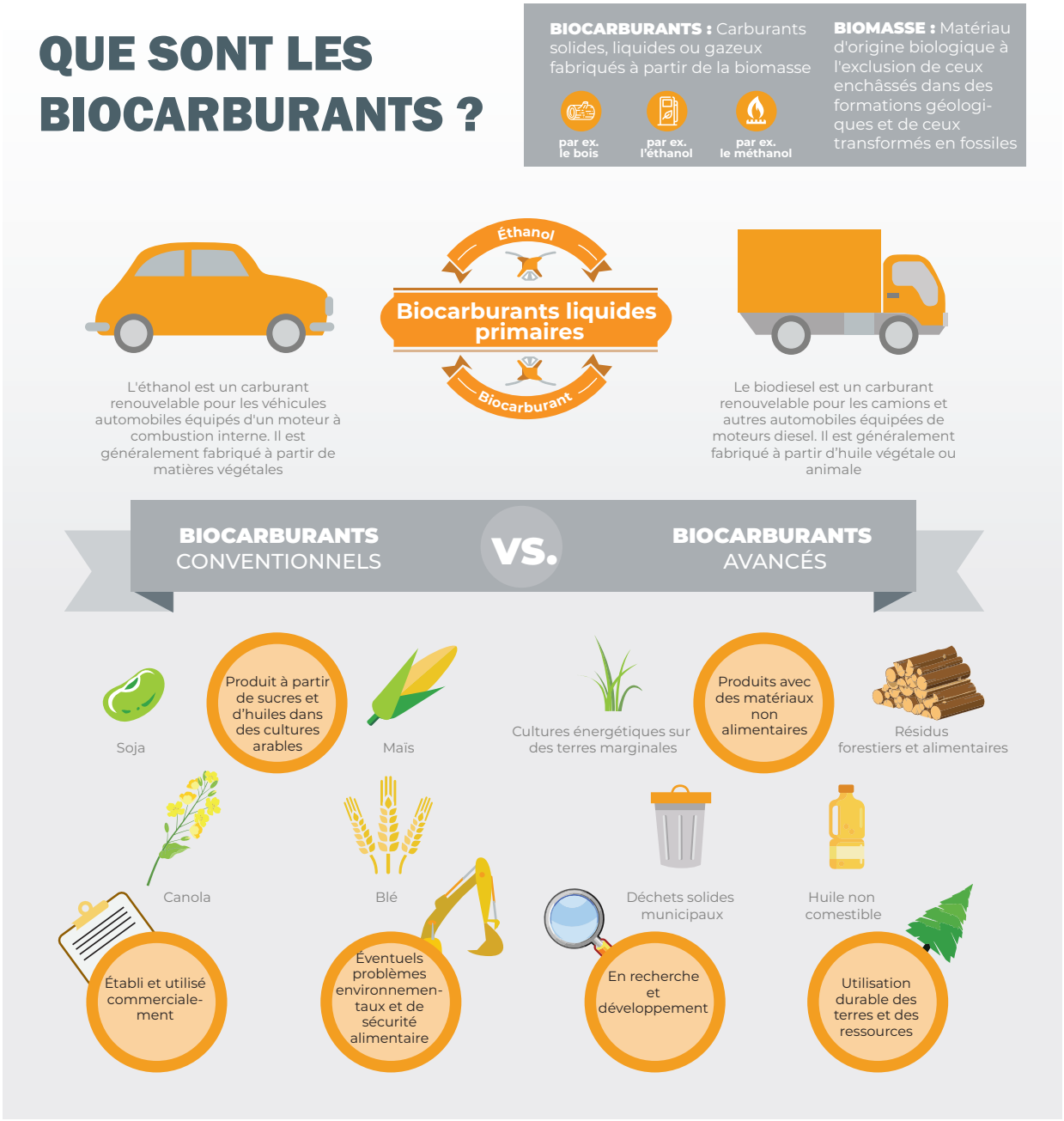
La façon la plus simple et la plus courante de produire de l'énergie à partir de biomasse est de la brûler. Toutefois, on ne peut faire de feu qu'à partir de bois sec et résineux, et il convient de s'assurer que le feu est disposé de manière à pouvoir brûler convenablement. Les scientifiques s'emploient à concevoir des technologies plus économiques, qui nous permettront de brûler de la biomasse brute humide ou composée de plusieurs ingrédients de manière plus efficace et plus respectueuse de l'environnement.

La fibre végétale peut être brûlée pour obtenir directement de l'énergie, ou transformée en un combustible universel plus facile à transporter et à utiliser dans diverses machines et appareils existants. Les plantes contenant de l'huile peuvent être utilisées pour produire divers diesels liquides (biodiesel). Les produits végétaux contenant du saccharose et de l'amidon peuvent être utilisés pour produire de l'alcool (éthanol), qui est également utilisé comme carburant.

Il existe différents types de biocarburants. L'éthanol et le biodiesel sont les principaux carburants utilisés par les voitures et les camions. Il existe également des biocarburants conventionnels produits à partir du sucre et des huiles des cultures arables, ainsi que des biocarburants avancés produits à partir de produits tels que les résidus forestiers et agricoles.

Les préoccupations concernant la durabilité de la production de biocarburants et la concurrence pour l'accès aux terres destinées à la production alimentaire attirent de plus en plus l'attention vers les biocarburants avancés. En plus d'économiser du CO_2, ces carburants s'inscrivent également dans ce qu'on appelle l'économie circulaire.

Figure 3.1.13 Types de biocarburants



Le Brésil figure parmi les leaders mondiaux en matière de production et d'utilisation de l'éthanol issu de la canne à sucre. L'éthanol couvre actuellement 18 % des besoins en carburant automobile du pays.

Figure 3.1.14

Usine de bioéthanol au Brésil

Figure 3.1.15

Dans les stations-service brésiliennes, il est possible de faire le plein de votre véhicule avec du biocarburant

Des sources d'énergie étonnantes

L'Australie possède actuellement la première centrale électrique du monde à utiliser des coques de noix comme combustible. Sa construction a coûté 3 millions de dollars australiens, mais elle devrait être rapidement rentabilisée : cette centrale électrique à haut rendement peut traiter jusqu'à 1 680 kg de coques de noix par heure pour produire 1,5 MW d'électricité.

Des scientifiques indiens ont proposé une autre source d'énergie alternative, utilisant des bananes, d'autres fruits et légumes, ainsi que leurs parties non comestibles (peau, pépins). Quatre batteries alimentées par ces combustibles peuvent faire fonctionner une horloge, un jeu électronique ou une calculatrice de poche. Cette innovation est principalement destinée aux populations rurales qui possèdent une abondance de fruits et de légumes pour recharger leurs batteries.
Certains pensent même que les gens pourront, dans un futur proche, produire de l'électricité grâce aux mouvements de leurs propres corps. Des chercheurs américains sont en train de développer une chaussure spéciale avec inserts en plastique : lorsque la personne marche, son pied appuie sur l'insert et le relâche, ce qui entraîne son rétrécissement et sa dilatation. Ce mouvement peut être utilisé pour produire jusqu'à 3 watts d'électricité, ce qui est suffisant pour écouter la radio ou de la musique en marchant, et préserver sa batterie.

La fermentation est une autre façon d'utiliser la biomasse.

Les animaux de ferme, qui mangent et digèrent les plantes, produisent du fumier qui peut être utilisé pour générer de l'énergie. Si le fumier et les déchets alimentaires sont collectés dans un récipient fermé qui est ensuite chauffé à 50-60 °C, les bactéries décomposeront la matière organique pour produire du méthane, qui peut être collecté et utilisé comme combustible.

Chaque année, le monde produit, utilise ou détruit environ 170 milliards de tonnes de biomasse primaire.

3.1.6 Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie

Maintenant que nous savons quelles sont les différentes sources d'énergie, nous aimerions savoir laquelle est la meilleure ? Quelles sont les énergies les plus respectueuses de l'environnement ? Quelles sont les énergies les moins nocives pour le climat ? Quelles sont les énergies les moins onéreuses ?

Les réponses à ces questions ne sont pas aussi simples qu'elles n'y paraissent. De nombreux facteurs sont à prendre en compte lors de la comparaison des différents combustibles.

Critères de comparaison des sources d'énergie

- Les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de la production et de l'utilisation des sources concernées.
- Les émissions (dans le cadre de la production et de l'utilisation) de substances nocives considérées comme dangereuses pour la santé humaine et l'environnement.
- Le coût de transport des combustibles du lieu de production à la centrale électrique.
- Le coût de distribution de la chaleur et de l'électricité à des consommateurs situés loin de l'endroit où celles-ci sont produites.
- Les coûts de construction et d'exploitation d'une centrale, et de démantèlement à la fin de sa durée de vie utile.
- Les coûts environnementaux (gestion des accidents, prise en charge des victimes d'accidents et indemnisation de leurs familles, plantation d'arbres pour contrebalancer les émissions de gaz à effet de serre).
- La situation climatique et géographique des centrales électriques. Quelle source utiliseront-elles pour leurs besoins en eau et comment l'eau sera-t-elle purifiée ? Quels sont les vents dominants à l'endroit concerné et existe-t-il un risque de situations météorologiques ou sismiques critiques ? Existe-t-il des voies de transport adaptées pour l'approvisionnement en matières premières ? Quels sont les habitats naturels, les paysages et les installations humaines présents à proximité ?
- Matériel de purification et recyclage. La centrale est-elle dotée des derniers équipements ? Le système de prévention des émissions polluantes est-il aux normes, et un espace suffisant a-t-il été attribué au stockage et au recyclage des déchets ? Dans les premiers temps, la centrale ne rencontrera peut-être pas de problèmes sérieux avec la gestion des déchets, mais la question pourrait se poser par la suite.

Cela n'a aucun sens de discuter de l'efficacité de la technologie et du coût de l'énergie sans tenir compte des questions de changement climatique, d'environnement et de santé. Ainsi, avant de décider quel type de centrales électriques doivent être construites et exploitées, une grande variété d'évaluations (techniques, économiques, environnementales, etc.) doit être réalisée.

Rappelons et comparons encore une fois les avantages et les inconvénients des principales sources naturelles d'énergie.

Le charbon

Le charbon est un combustible universel : il peut être utilisé quel que soit le climat, par des centrales de petite ou de grande taille, et même pour faire bouillir l'eau.

Le charbon est le combustible le « plus sale » pour la production d'électricité. Une centrale au charbon d'une capacité de 1 MW émet chaque année 36,5 milliards de m^3 de gaz chauds contenant à la fois de la poussière et des substances dangereuses. Elle produit également de grandes quantités de cendres, qui doivent être stockées. Et, plus important encore, le volume des émissions de CO_2 émanant des centrales au charbon pour chaque unité d'énergie produite est le plus élevé qui soit par rapport aux autres sources d'énergie hydrocarbures.
L'extraction du charbon est également une activité dangereuse. La libération de gaz naturels souterrains peut entraîner des explosions fatales pour les mineurs. L'eau salée et sale pompée hors des mines s'infiltre souvent sans les rivières et les lacs (il faut en moyenne pomper 3 tonnes d'eau par tonne de charbon produite), nuisant ainsi aux animaux et aux plantes, et polluant ainsi l'eau et le sol à l'échelle locale.

Le pétrole

Le pétrole est très simple à utiliser, et peut être transporté sur de longues distances par le biais de pipelines ou dans des cuves. Le pétrole est utilisé pour la production de caoutchouc, plastiques, teintures, détergents et autres produits.

Les réserves de pétrole s'appauvrissent et les coûts de production pétrolière sont en hausse. Le pétrole est hautement inflammable, et les déversements de pétrole sont désastreux pour l'environnement, puisqu'il recouvre tous les organismes vivants d'une fine pellicule hautement destructrice pour les écosystèmes. Un tel déversement dans un fleuve ou en mer peut se répandre sur de très grandes distances. La combustion de pétrole produit de grandes quantités de CO_2.

Le gaz naturel

Le gaz naturel est l'hydrocarbure le plus propre et le plus respectueux de l'environnement. Il est facile à transporter.

Le gaz est explosif, même en quantités infimes. Les émissions de gaz à effet de serre émanant de la combustion de gaz naturel sont inférieures à celles des autres hydrocarbures, mais demeurent significatives. Par ailleurs, les réserves de gaz ne sont pas infinies, même si le développement du gaz de schiste vient s'y ajouter.

L'énergie nucléaire

☺ La production d'énergie nucléaire n'émet aucun gaz à effet de serre. Les réserves de combustible nucléaire sont assez importantes étant donné que l'on peut obtenir une grande quantité d'énergie d'une infime quantité de combustible.

☹ L'énergie nucléaire doit être produite dans des centrales de très grande taille et ne peut être transportée que sous forme d'électricité (et non de chaleur), car le risque de fuite radioactive rend indispensable l'installation des centrales nucléaires loin de toute grande ville, où les consommateurs d'eau chaude et de chaleur se concentrent. Les centrales nucléaires produisent des déchets, qui restent dangereux pendant des siècles et doivent par conséquent être éliminés de manière appropriée. Même si elle n'émet aucun gaz à effet de serre, la production nucléaire produit des eaux usées irradiées. Le principal inconvénient de l'énergie nucléaire est que même des accidents mineurs peuvent avoir des conséquences désastreuses.

Le soleil

☺ L'énergie solaire est renouvelable. Elle peut être utilisée dans de nombreuses régions du monde. Elle ne produit aucun polluant nocif ni aucun gaz à effet de serre.

☹ Les flux d'énergie solaire sont inégaux, des batteries supplémentaires sont donc nécessaires pour transformer le flux d'énergie la nuit ou par temps couvert. Les cellules solaires sont onéreuses, même si les scientifiques cherchent un moyen de réduire le coût de leur production. L'élimination des cellules solaires pose certains problèmes, car elles contiennent des substances nocives, et les centrales solaires occupent de grands espaces de terres.

Le vent

☺ L'énergie éolienne est renouvelable et ne produit aucune émission de gaz à effet de serre ou de polluant nocif.

☹ Les parcs éoliens nécessitent un vent fort et constant. Des batteries et transformateurs supplémentaires sont nécessaires pour que le parc éolien puisse continuer à fonctionner en cas de faible vent. La rotation des pales émet des vibrations et du bruit, ce qui peut effrayer les animaux et créer un désagrément pour les personnes, qui peuvent également s'opposer à l'installation visible d'éoliennes géantes venant complètement modifier le paysage. Un dispositif doit également être mis en place pour éloigner les oiseaux qui, sans cela, pourraient être heurtés par la rotation des pâles.

L'eau

☺ L'hydroélectricité, l'énergie marémotrice et l'énergie houlomotrice sont renouvelables, librement accessibles et ne produisent aucune émission de gaz à effet de serre et polluants.

☹ L'énergie hydroélectrique ne peut être produite qu'en présence d'étendues d'eau. La construction de grandes centrales hydroélectriques implique l'inondation des terres situées autour du réservoir, ce qui est un processus particulièrement complexe et onéreux. La construction de centrales hydroélectriques a une incidence négative sur les écosystèmes fluviaux et côtiers. Les accidents au sein des centrales hydroélectriques peuvent entraîner l'inondation des villes et villages situés en aval de la centrale.

La chaleur de la terre et l'énergie à faible température

L'énergie provenant de l'intérieur de la terre est renouvelable et accessible partout. Elle ne produit aucune émission de gaz à effet de serre ou de polluants.

Le processus d'extraction de l'énergie provenant de sources souterraines profondes demeure onéreux et complexe pour le moment. L'utilisation à long terme de réservoirs géothermiques (en pompant eau et vapeur) entraîne des affaissements de terrain. Cette chaleur ne peut donc être utilisée que comme source d'énergie auxiliaire.

La biomasse

La biomasse est librement accessible et facile à utiliser. Ses émissions de CO_2 dans l'atmosphère ne sont pas supérieures aux émissions que produirait la décomposition naturelle de végétaux. L'utilisation de la biomasse dans les régions dont elle est issue (régions agricoles et d'exploitation forestière) résout le problème de l'élimination des déchets. Les biocarburants résultent essentiellement de l'extraction de l'énergie des déchets. Le fumier peut être utilisé pour produire à la fois des combustibles gazeux et du fertilisant.

La biomasse brute est difficile et chère à transporter. La production de combustible gazeux issu de la biomasse nécessite le maintien de la température de fermentation, une certaine prudence pour éviter les explosions, une vérification que les bactéries ne vont pas se répandre et devenir source de maladie. Le gaz n'a pas non plus une odeur très agréable !
Certains producteurs entreprenants de produits agricoles souhaitent aujourd'hui dédier leurs champs à la production de biomasse, plutôt qu'à des cultures vivrières traditionnelles car elle procure davantage de revenus. Cela réduit la production alimentaire et menace donc la sécurité alimentaire.

Si les énergies renouvelables sont inépuisables et respectueuses de l'environnement, pourquoi ne pas changer complètement et passer du charbon, du pétrole et de l'énergie nucléaire aux technologies vertes ?

Le fait est qu'il existe encore certaines restrictions quant au développement de masse de l'énergie renouvelable. Le fonctionnement des centrales utilisant des sources d'énergie renouvelables dépend des conditions climatiques, et c'est pourquoi on les appelle sources d'énergie variables (force du vent, présence de cours d'eau, nombre de jour d'ensoleillement). Chaque centrale utilisant une source d'énergie renouvelable aura ses propres particularités. L'utilisation réussie des énergies renouvelables requiert donc un investissement considérable d'argent et d'efforts au moment de leur conception et de leur construction. Lorsque la capacité des centrales de production d'énergies renouvelables atteint un certain niveau, leur expansion nécessitera d'importants investissements dans le réseau électrique et une transition progressive vers les « réseaux intelligents ». Néanmoins, les nouvelles technologies permettent progressivement de rendre la production d'énergie à partir de sources renouvelables plus efficace, d'en réduire les coûts de production et d'en étendre les marchés.

La demande énergétique est constante, le secteur de l'énergie, et notamment la production et le commerce de pétrole, de gaz et de charbon, est particulièrement rentable. Les sommes d'argent échangées dans ce secteur sont colossales, ce qui entraîne de sérieux désaccords entre les organisations gouvernementales, professionnelles et environnementales de la société civile. Ce problème existe dans tous les pays du monde, mais, si nous regardons les tendances à long terme, nous pouvons constater que les populations du monde entier sont désormais désireuses de comprendre les changements à mettre en place pour l'avenir de l'humanité et de la planète. L'introduction de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement est retardée par l'inertie de la pensée humaine. Notre planète et l'univers sont prêts à nous offrir leurs énergies, mais en retour nous devons apprendre à utiliser les ressources naturelles de façon à protéger le climat, et non pas le détruire aux fins de bénéfices à court terme !

QUESTIONS

1. Quelles sont les sources d'énergies qui étaient utilisées aux temps anciens ?

2. Quelles sont les façons d'utiliser les panneaux solaires que vous connaissez ?

3. Répertoriez tous les facteurs que vous connaissez qui sont à prendre en compte si nous devons déterminer le coût total de la production d'électricité à partir de l'une ou l'autre des sources d'énergie.

4. Les moteurs électriques ne produisent pas d'émissions nocives. Pouvons-nous donc les considérer comme le type de moteur le plus respectueux de l'environnement ?

5. Les panneaux solaires sont installés sur les toits des maisons avec un angle égal à la latitude du lieu où ils sont employés. Pour quelle raison selon vous ?

6. Quels sont les principaux obstacles à la croissance rapide de la capacité des énergies renouvelables ?

EXERCICES

1

Expérience
But de l'expérience : produire de la lumière en utilisant les énergies renouvelables.
Matériel : une bouteille en plastique transparent contenant de l'eau, une petite table, des couvertures.
Comment procéder : Faites une ouverture dans une couverture où une bouteille peut être placée.
Couvrez la table avec des couvertures pour qu'aucune lumière ne pénètre dans la petite « maison » que vous avez créée sous la table. À votre avis, que se passera-t-il lorsque vous entrerez dans la « petite maison » et que vous placerez la bouteille dans l'ouverture que vous avez pratiquée sur le couvercle ? Qu'avez-vous remarqué ? Comment expliquez-vous le phénomène que vous avez observé ? Suggérez une alternative à la bouteille d'eau comme outil pratique. Quelles sont vos idées pour éclairer la petite maison que vous avez réalisée ?

2

Expérience
Répartissez-vous en plusieurs groupes selon les différents modes de production d'électricité.

Chaque groupe doit élaborer un rapport pour défendre son mode de production d'électricité, et y inclure des informations concernant les problèmes associés aux autres modes de production.
Entamez ensuite un débat sur les effets bénéfiques et nocifs des différents types de centrales électriques, en fonction de la région où vous vivez.

3.2 Efficacité énergétique et économie d'énergie

La première façon d'atténuer les changements climatiques est d'utiliser les sources d'énergie qui causent le moins de dommages à l'environnement et au climat, comme nous l'avons suggéré dans la section précédente.

La deuxième façon est de réduire notre consommation énergétique globale. Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur deux concepts semblables, mais différents : l'efficacité énergétique et l'économie d'énergie.

Un appareil est économe en énergie s'il utilise moins d'énergie que d'autres appareils semblables pour effectuer le travail auquel il est destiné. À titre d'exemple, deux lampes peuvent produire la même quantité de lumière dans une pièce, mais consommer différentes quantités d'électricité. La lampe qui consommera le moins d'énergie sera plus efficace du point de vue énergétique. Nous pouvons économiser beaucoup d'énergie en éteignant la lumière lorsque nous n'en avons pas besoin, en gardant les fenêtres, les appareils d'éclairage et les lampes propres, en installant des ampoules plus économes en énergie. Au lieu de prendre la voiture, nous pouvons marcher et utiliser le vélo, lorsque cela est possible.

Figure 3.2.1 **Comparaison de l'efficacité énergétique de différentes ampoules**

Ampoule incandescente classique

Ampoule fluorescente (contient du mercure ; élimination spéciale requise)

Diode électroluminescente (LED)

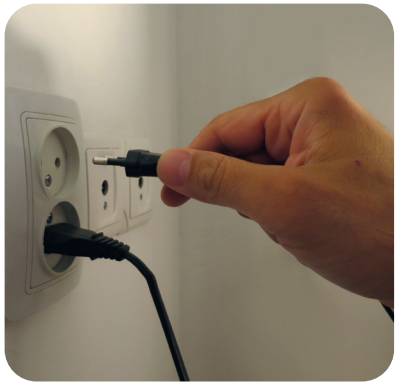
L'EFFICACITE ÉNERGÉTIQUE
est le rapport entre la quantité d'énergie consommée et le résultat utile obtenu de sa consommation, comme l'éclairage ou l'énergie pour cuisiner. En reconnaissance de l'importance de l'efficacité énergétique, on l'appelle parfois « le premier carburant ».

L'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE
regroupe l'ensemble des mesures prises afin de réduire la quantité d'énergie consommée.

Par conséquent, la plupart du temps, il n'est pas nécessaire d'inventer quoi que ce soit pour être en mesure d'économiser de l'énergie. Il nous faut simplement changer nos habitudes, de manière à mettre fin au gaspillage !

L'électricité destinée à l'éclairage représente 15 à 20 % de la consommation mondiale d'électricité. En Europe, l'éclairage représente environ 10 % de la consommation électrique dans les bâtiments résidentiels, lesquels sont le troisième principal consommateur, après l'électricité d'appareils de chauffage et de climatisation. Dans les immeubles de bureaux, l'éclairage peut consommer encore plus d'énergie (30 à 40 %). Il est toutefois possible de réduire l'énergie consommée par l'éclairage des bâtiments commerciaux et résidentiels sans pour autant assombrir les pièces et en faisant d'importantes économies sur les factures d'électricité en choisissant des ampoules appropriées basées sur des diodes électroluminescentes (Fig. 3.2.1).

Par exemple, nous nous brossons tous les dents le matin. Avons-nous besoin de laisser le robinet ouvert comme nous le faisons ? Non, nous en avons besoin uniquement lorsque nous nous rinçons la bouche. Mais observez vos habitudes et celles de votre famille : se brossent-ils tous les dents en fermant le robinet ? Une grande quantité d'énergie est nécessaire pour faire sortir l'eau de nos robinets, des opérations menées à l'usine de traitement au système de pompage, sans parler de l'eau elle-même.



Lorsque nous éteignons la télévision (et certains autres appareils électroniques), nous la mettons en veille. Ce que de nombreuses personnes ne savent pas, c'est que la télévision continue de consommer de l'énergie même en veille, même si cela n'est pas autant que lorsqu'elle est allumée et ne fait grimper la facture d'électricité que de quelques centimes chaque mois. Cela peut ne pas valoir la peine de s'embêter, mais imaginez la quantité d'énergie gaspillée à l'échelle d'un quartier entier, d'une ville entière ou d'un pays entier ! Par conséquent, dans les pays où l'économie d'énergie est une question sérieuse, il est recommandé à la population de ne pas mettre ses appareils en veille, mais de les éteindre.

Selon les estimations, le fait de charger un téléphone portable émet 0,3 kg de CO_2 par an, et si le chargeur de téléphone est branché en permanence (sans être utilisé), alors on parle de 2,4 kg de CO_2 émis.

Émissions de CO_2 résultant de l'utilisation de téléphones portables

- 2 minutes d'utilisation par jour produit 47 kg par an
- 1 heure d'utilisation par jour produit 1 250 kg par an
- 1 minute produit environ 57 g
- 1 SMS produit 0,014 g
- 1 recherche sur Google produit 0,2 g (les émissions annuelles totales résultant de l'utilisation de Google s'élèvent à 1,3 million de tonnes)

La demande de services numériques augmente rapidement. L'AIE estime que depuis 2010, le nombre d'internautes dans le monde a plus que doublé, tandis que le trafic Internet mondial a été multiplié par 25. Les améliorations rapides de l'efficacité énergétique ont toutefois contribué à modérer la croissance de la demande énergétique des centres de données et des réseaux de transmission de données, dont chacun représente 1 à 1,5 % de la consommation mondiale d'électricité. Dans l'ensemble, l'industrie informatique est responsable d'environ 2 à 2,8 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone, certains scientifiques évaluant ce chiffre à environ 3,8 %, qui inclut les émissions liées à l'utilisation des ordinateurs personnels.

Certains d'entre vous ont probablement entendu parler de l' « hébergement vert », un type de services d'hébergement Internet utilisant des technologies écologiques pour réduire les effets négatifs sur le climat et l'environnement. L'hébergement vert consiste à compenser les émissions de dioxyde de carbone produites par ses services d'hébergement en employant des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique), en plantant des arbres et autres végétaux, et en mettant en place d'autres mesures visant à économiser l'énergie. Certains experts désignent les technologies cloud comme une forme prometteuse d'hébergement vert. Les technologies cloud permettent une utilisation plus efficace des capacités informatiques, notamment en réduisant la consommation énergétique.

Les inventions humaines progressent de jour en jour. Toutefois, seule une petite partie des nouvelles inventions sont réellement utilisées. Avant qu'une nouvelle technologie puisse remplacer une technologie existante, les gens doivent changer leurs habitudes.

Technologies cloud

Il n'y a pas que le monde réel qui évolue, le monde virtuel également. Les utilisateurs d'Internet bénéficient depuis peu d'un nouvel outil appelé le « cloud computing »(ou informatique en nuage), déjà utilisé par Facebook, Twitter et les « machines »proposant des services telles que Google Docs, Gmail et autres.

La plupart des sites Internet et applications serveur fonctionnent sur des ordinateurs ou serveurs spécifiques. Le cloud est un réseau d'ordinateurs constituant un système qui permet aux individus d'utiliser certaines applications ou de stocker des données. On pourrait le qualifier d'ordinateur virtuel mondial sur lequel les applications fonctionnent indépendamment de chaque ordinateur individuel, avec des caractéristiques qui lui sont propres.

À mesure que l'Internet à large bande se développe, il devient de moins en moins nécessaire d'avoir une application installée sur votre propre ordinateur.
Tous les « clouds »étant configurés pour fonctionner ensemble, l'intégralité de la puissance de ces machines est mise à la disposition des applications comme si l'application fonctionnait sur un seul ordinateur individuel. Une part croissante des logiciels actuels repose sur les technologies web, et les « clouds »ne font que prendre le relais afin d'amener les avantages offerts par les applications web à un niveau supérieur.

Changer ses habitudes, c'est d'abord trouver le temps de se familiariser avec l'invention.

Deuxièmement, il faut consacrer de l'argent et des efforts au retrait de l'ancienne machine et à son remplacement par la nouvelle, et apprendre aux gens comment s'en servir. Cet argent et ces efforts seront certainement rentables, mais pas immédiatement, et tout le monde ne souhaitera pas se donner tant de mal pour un bénéfice qui ne pourra être tiré qu'ultérieurement.

Troisièmement, les personnes qui gagnent de l'argent grâce à la vente de l'ancienne technologie ne souhaitent pas perdre leur activité, notamment si elle leur rapporte plus d'argent que la nouvelle technologie. Elles pourraient même tenter de faire obstacle à la nouvelle invention, en l'empêchant d'être largement utilisée, en convainquant les gens de sa dangerosité, ou même en menaçant l'inventeur.

Résumer l'ensemble des technologiques économes en énergies nécessiterait un ouvrage conséquent. Quelle que soit la voie que vous suivrez dans votre vie, une bonne connaissance des équipements que vous utiliserez et le soutien des efforts entrepris pour les améliorer seront essentiels. Souvenez-vous, la voie à suivre ne réside pas toujours dans la fabrication de machines plus efficaces, cela dépend également beaucoup de la manière dont est organisé le travail des personnes.

L'efficacité énergétique et l'économie d'énergie sont très importantes. Pour les ménages, elles signifient des économies sur les factures de gaz et d'électricité. Pour les compagnies d'électricité, elles signifient réduction des coûts de carburant et fourniture d'une électricité moins chère. Pour le pays, elles signifient moins de dépenses consacrées aux ressources, et établissement d'une industrie plus productive et concurrentielle. Pour le climat elles signifient réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

La réduction de la consommation d'électricité dans différents pays entraînera différentes quantités d'émissions économisées, car cela dépend de la combinaison de combustibles utilisés pour la production d'électricité. Le rapport des émissions de CO_2 par kW-heure produit ou économisé est appelé facteur d'émission du réseau. Les pays dotés d'un système électrique hydroélectrique, comme le Bhoutan, ont un facteur d'émission nul sur le réseau. La CCNUCC fournit un ensemble harmonisé de facteurs d'émission de réseau pour plus de 200 pays (voir https ://unfccc.int/documents/198197).

Par exemple, chaque personne en Russie consomme environ 2 kWh chaque jour en moyenne. Un citoyen économe s'en sort avec 1 kWh, tandis qu'un utilisateur plus enclin au gaspillage énergétique peut consommer jusqu'à 3 kWh par jour. La Fig. 3.2.2 indique comment le Russe moyen, vivant dans un appartement, utilise l'énergie pour ses divers besoins au cours d'une année. La production de 1 kWh d'électricité génère en moyenne 800 g de CO_2. Les émissions occasionnées par la production d'électricité dans le centre de la Russie européenne sont deux fois inférieures, car une grande partie des besoins énergétiques de cette partie du pays sont couverts par des centrales électriques alimentées par du gaz naturel, de l'hydroélectricité ou de l'énergie nucléaire, alors que le charbon n'est plus guère employé. Les émissions de CO_2 émanant de la combustion du gaz naturel sont nettement inférieures à celles émanant de la combustion du charbon, et les récentes centrales de cogénération émettent moins de CO_2 que les anciennes centrales.

Dans les régions du nord de la Russie et dans l'Extrême-Orient de la Russie, où le charbon est bien plus utilisé pour la production d'électricité et où le combustible doit être transporté sur de longues distances, une réduction de la consommation d'électricité de l'ordre de 1 kWh permet une réduction des émissions à hauteur d'environ 3 kg de CO_2. Par conséquent, les économies annuelles de CO_2 de trois personnes passant de consommateurs « moyens » à consommateurs « économes » s'élèvent à 3 tonnes.

Figure 3.2.2 **Potentiel d'économies d'énergie dans les habitations privées**

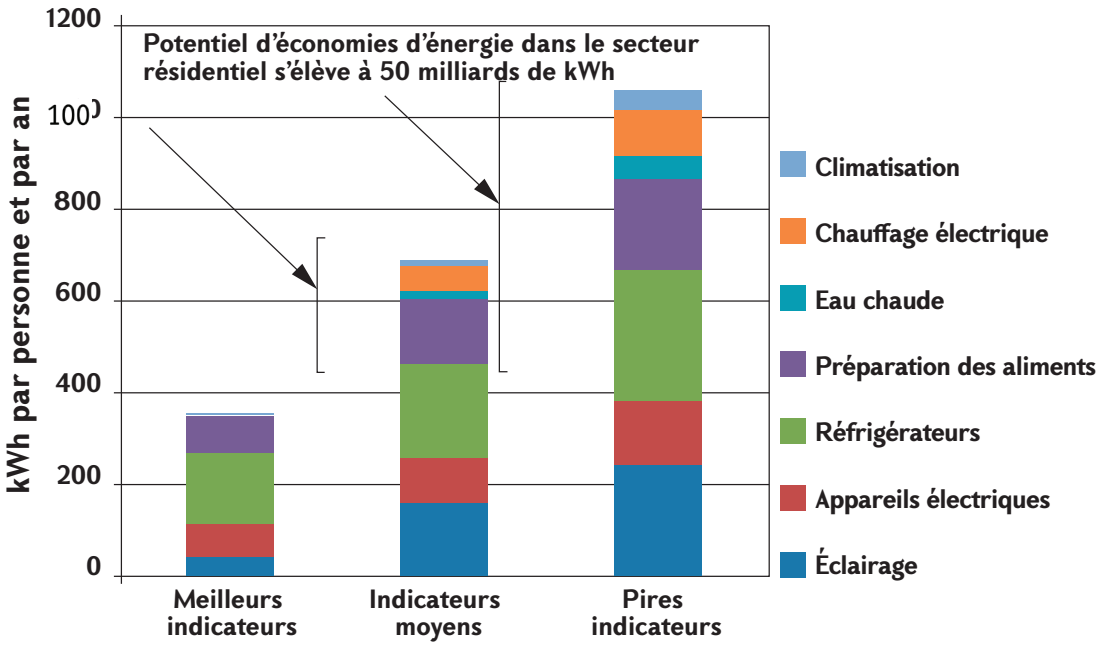


Figure 3.2.3

Centrale thermique au charbon

Figure 3.2.4

Centrale thermique au gaz naturel

Figure 3.2.5

Centrale nucléaire

3.2.1 Transports respectueux de l'environnement

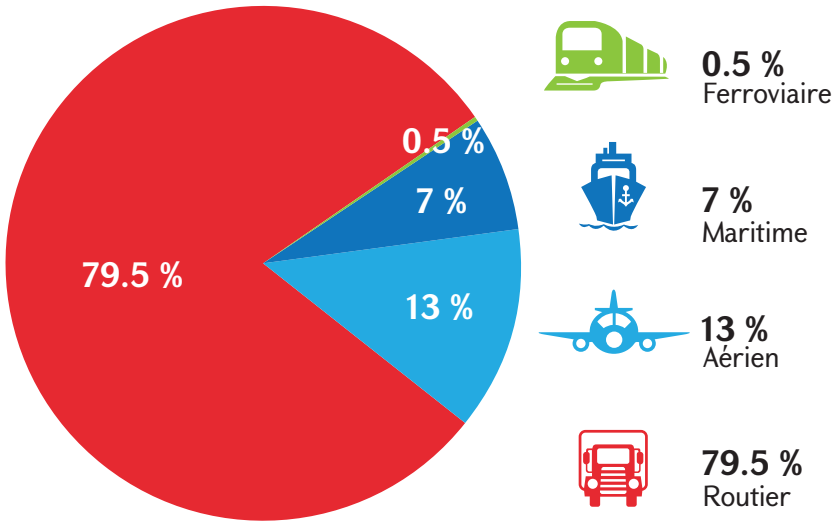
Les moyens de transport, de la voiture à l'avion, consomment autant de combustibles fossiles que les centrales électriques. Bien sûr, les besoins en carburant d'une seule voiture sont négligeables comparés aux besoins considérables d'une centrale électrique. Cependant, le nombre de voitures est bien plus élevé que le nombre de centrales électriques. Au total, les moyens de transport sont responsables d'environ 14 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

La plupart des voitures roulent encore à l'essence. La combustion d'un litre d'essence produit environ 2,3 kg de CO_2. Par exemple, le véhicule canadien moyen, qui brûle 2 000 litres d'essence chaque année, rejette environ 4 600 kg de CO_2 dans l'atmosphère. Le moteur à combustion interne, qui propulse les véhicules automobiles, rejette dans l'atmosphère des gaz d'échappement contenant de l'azote, de la vapeur d'eau et du CO_2 (entre 1 et 12 % du volume des émissions), ainsi que des composés toxiques, voire cancérigènes (suie et benzopyrène).

Dans l'ensemble, les émissions de CO_2 par tonne de carburant, de l'extraction du pétrole de gisements pétrolifères à la combustion de l'essence raffinée dans un moteur, s'élèvent à un total de 3 769 kg.

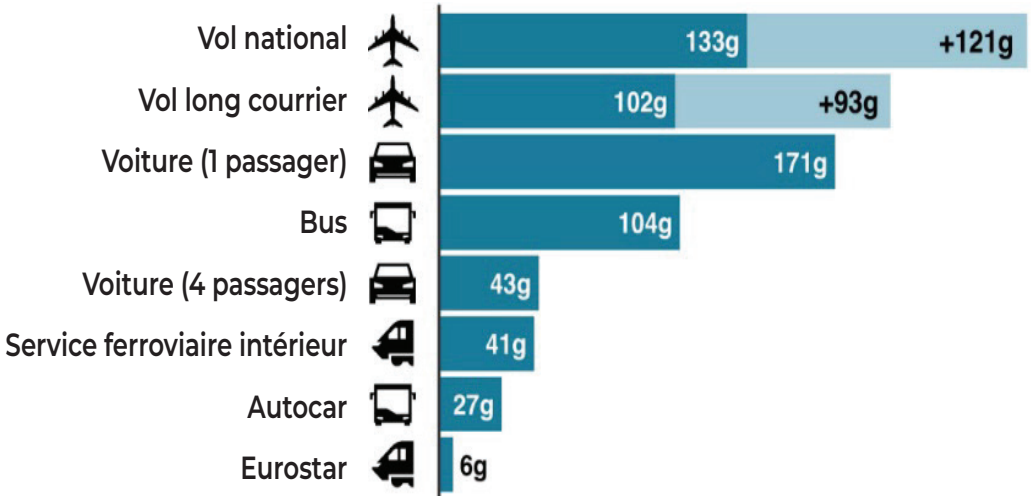
L'impact des transports sur le changement climatique est considérable, la plupart des modes de transport utilisant des combustibles fossiles, dont la combustion provoque des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Néanmoins, selon le transport, les impacts sont différents. Le transport ferroviaire est le moyen de transport le plus respectueux de l'environnement, les vols aériens sont considérés comme ceux les émissions en carbone sont les plus intenses, tandis que les voitures sont responsables de près de 80 % des émissions de gaz à effet de serre imputables aux transports (Fig. 3.2.6).

Figure 3.2.6 **Ventilation des émissions de gaz à effet de serre par mode de transport.**



Le Royaume-Uni a estimé les émissions par passager et par kilomètre parcouru dans différents modes de transport. Il montre que prendre l'avion entraîne des émissions plus de 20 fois supérieures à celles du train Eurostar (Fig. 3.2.7).

Figure 3.2.7 **Estimations britanniques des émissions de GES (gCO_2e) des différents modes de transport par passager et par km parcouru**



Que peut-on faire pour réduire l'impact des transports sur le climat ?

L'une des méthodes les plus logiques et les plus efficaces serait de contacter les personnes éloignées par téléphone ou communication audio/vidéo plutôt que de leur rendre visite en personne. Les meilleurs outils pour le faire à l'heure actuelle sont les application Skype, Zoom, Viber, Telegram et WhatsApp qui vous permettent de communiquer avec vos amis partout dans le monde où il y a accès à Internet.

La meilleure façon de réduire les impacts climatiques des transports est d'utiliser les transports publics. Si vous et vos parents avez l'opportunité de choisir votre mode de déplacement, privilégiez le train. Le train est bien plus écologique lorsqu'il s'agit de parcourir de longues distances que l'avion.

Les technologies du transport ferroviaire ont considérablement progressé au cours de la dernière décennie. Les locomotives et matériels roulants sont fabriqués à partir de matériaux moins lourds et moins volumineux, et les moteurs sont devenus plus efficaces.

Le nombre de trains et de réseaux à grande vitesse augmente dans le monde entier, améliorant encore le mode de transport le plus économe en énergie. Le réseau ferroviaire à grande vitesse (TGV) en Chine est le plus long et le plus utilisé au monde – avec une longueur totale de 42 000 kilomètres d'ici fin 2022. Le TGV est également un moyen de transport de plus en plus populaire et efficace en Europe. Plusieurs pays ont construit de vastes réseaux à grande vitesse, par exemple l'Allemagne, la France, les Pays-Bas, l'Espagne, l'Italie et le Royaume-Uni, et il existe désormais plusieurs liaisons ferroviaires transfrontalières à grande vitesse. Les opérateurs ferroviaires gèrent fréquemment des services internationaux, et les voies sont continuellement construites et mises à niveau pour répondre aux normes internationales sur le nouveau réseau ferroviaire européen à grande vitesse.

Le train à grande vitesse japonais, appelé Shinkansen (Fig. 3.2.8), a récemment augmenté sa vitesse de circulation et réduit sa consommation énergétique de 40 %. En réduisant le poids du train à grande vitesse et en redéfinissant la forme et la longueur du nez pour le rendre plus aérodynamique, le train est désormais bien plus efficace et son utilisation entraîne moins d'émissions provenant du transport.

Figure 3.2.8

Le train à grande vitesse japonais « Shinkansen », économe en énergie

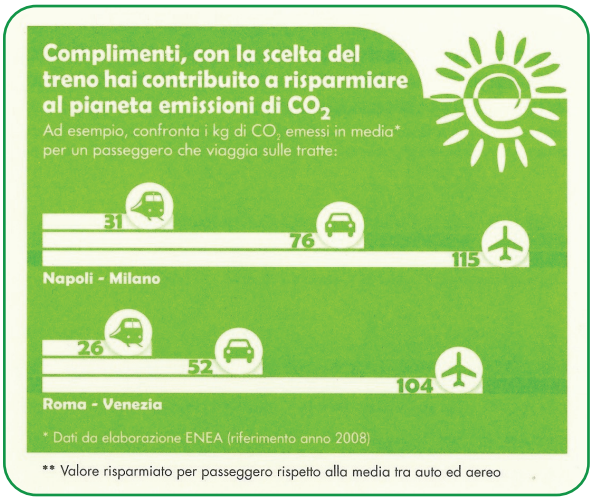


Figure 3.2.9

Le verso de ce billet de train italien informe les passagers de la contribution à la lutte contre le changement climatique qu'ils apportent en choisissant de voyager en train

De nombreuses sociétés ferroviaires prennent la peine de rappeler à leurs passagers que les déplacements en train sont une solution écologique.

En cas de déplacement en avion, alors mieux vaut privilégier des compagnies aériennes qui utilisent des avions récents : les avions modernes sont moins nocifs pour l'environnement que les précédents.

La vitesse ne fait plus partie des principales considérations lors de la conception de nouveaux modèles d'avions. Les concepteurs adoptent désormais une approche plus systématique qui vise à prendre en compte le rendement énergétique ainsi que l'empreinte carbone au cours de la fabrication. Les développeurs se penchent de nouveau sur les avions à turbopropulseurs, qui semblaient dépassés il y a 20 ans, car les avions à réaction sont plus rapides. Les avions à turbopropulseur pourraient constituer de bonnes solutions en matière de transport aérien s'ils intègrent de nouveaux designs améliorés.

Actuellement, plusieurs compagnies aériennes proposent des services visant à contrebalancer les émissions de dioxyde de carbone émanant de leurs avions, tandis que certains services Internet calculent les émissions de CO_2 de tous les vols et invitent les passagers à les compenser. Par exemple, un vol longue distance Berlin - San Francisco opéré par Lufthansa produit 1, 4 tonnes d'émissions de CO_2 par passager. Le montant suggéré pour compenser un voyage aller-retour en classe économique est de 29 euros, lequel sera reversé à des projets environnementaux liés au changement climatique (Fig. 3.2.10).

Figure 3.2.10 **Calcul des émissions de CO_2 et de la compensation pertinente pour un vol aller-retour Berlin - San Francisco en classe économique avec Lufthansa**

L'Organisation de l'aviation civile internationale travaille avec ses membres pour trouver les meilleurs moyens de réduire les émissions du secteur de l'aviation. Outre l'amélioration de l'efficacité, une option consiste à utiliser du carburant d'aviation durable (SAF), un carburant qui ne provient pas de combustibles fossiles. Les compagnies aériennes l'utilisent déjà, généralement en mélange avec du carburéacteur ordinaire. Mais nombreux sont ceux qui doutent que les SAF puissent être produits à un coût suffisamment bas ou en quantités suffisantes pour répondre aux besoins de l'industrie aérienne.

Cela explique pourquoi l'hydrogène comme carburant pour les avions suscite un intérêt croissant. L'hydrogène peut stocker beaucoup d'énergie, provenant par exemple de l'électricité renouvelable en dehors des heures de pointe de consommation, et lorsqu'il est utilisé comme carburant, il ne produit aucun CO_2.

Réduire les émissions de carbone des déplacements en voiture

Si vos parents envisagent d'acheter une voiture, parlez-leur de l'efficacité énergétique des différents véhicules motorisés. Proposez-leur d'acheter une voiture répondant au moins aux normes Euro-4 (les normes Euro applicables aux véhicules réglementent la teneur en hydrocarbures, azote, monoxyde de carbone et particules des gaz d'échappement).

L'impact des véhicules motorisés sur l'environnement peut également être réduit en se conformant aux règles d'« écoconduite », qui permettent de réduire l'empreinte carbone liées aux véhicules. L'écoconduite est non seulement censée pour l'environnement, mais elle constitue également une solution plus économique pour les propriétaires de véhicules. Expliquez cela aux adultes qui conduisent des voitures !

L'efficacité énergétique et la performance environnementale des moteurs automobiles sont des facteurs essentiels. Jusqu'à récemment, tous les véhicules à moteurs fonctionnaient au fioul, au diesel ou à l'essence, mais désormais un nombre croissant de véhicules fonctionnent au gaz. La consommation de carburant pour les véhicules alimentés au gaz est la même que pour les carburants traditionnels, toutefois les émissions polluantes du gaz sont bien inférieures.

Vous avez probablement également entendu parler des voitures « hybrides », des voitures électriques et des voitures fonctionnant au biocarburant. Il existe également des véhicules spéciaux capables de fonctionner uniquement à l'eau et à l'air (« aéromobile »), ainsi que des véhicules électriques fonctionnant à l'énergie solaire. Le championnat de course de voitures solaires organisé régulièrement en Suisse est le meilleur endroit qui soit pour voir l'ensemble des dernières technologies de véhicules solaires en action. Fait de plus en plus courant : il existe désormais des stations-service solaires aux États-Unis, en Bulgarie, en Suisse, en Allemagne et dans d'autres pays.

Figure 3.2.11

Stationnement pour véhicules électriques

Les règles de l'écoconduite : comment réduire l'empreinte carbone d'un véhicule

- Éteindre le moteur à l'arrêt et dans les embouteillages.
- Entretenir correctement sa voiture : un réglage correct des roues permet de réduire la consommation de carburant de 5 à 10 %, et un entretien régulier du véhicule permet d'économiser 10 % de carburant.
- Vérifier régulièrement la pression des pneumatiques : même dans les environnements urbains, une pressions des pneus 25 % en-deçà du niveau recommandé demande 10 % de carburant en plus pour faire rouler le véhicule.
- Utiliser le contrôle de la température et la climatisation modérément. Ne pas en faire usage si la température à l'extérieur du véhicule les rend inutiles. Ne pas ouvrir la fenêtre du véhicule lorsque la climatisation fonctionne.
- Freiner en douceur afin d'utiliser au mieux l'inertie du véhicule et ainsi réduire la consommation de carburant.
- Prendre des passagers. Cela s'appelle le « covoiturage ». En prenant en charge 3 ou 4 personnes qui font le même trajet que vous, vous réduisez de 3 ou 4 fois la quantité d'émissions.
- Rester sur la même file : passer d'une file à l'autre augmente la consommation de carburant et, par conséquent, les émissions de dioxyde de carbone.
- Partir tôt, éviter les périodes de pointe, programmer son itinéraire à l'avance.
- Conduire à vitesse modérée et constante. Utiliser moins la pédale de frein et davantage le frein moteur, freiner et accélérer en douceur, anticiper la circulation (ne pas accélérer en arrivant sur un feu rouge). Une conduite souple permet d'économiser du carburant.
- Ne pas trop charger le toit. À une vitesse de 120 km/h, un coffre de toit vide augmente la consommation de carburant de 5 à 10 %, un porte-skis de 10 à 20 %, un porte-vélo de 30 %, quant au coffre de toit plein il consomme 30 à 40 % de carburant en plus.

Figure 3.2.12 **Une voiture électrique**

Aujourd'hui, les principaux constructeurs automobiles, s'attachent à concevoir des véhicules plus respectueux de l'environnement que les modèles précédents. La consommation de carburant et l'impact sur l'environnement sont devenus des points essentiels pour les acheteurs, au même titre que la qualité, la sécurité et le prix. Les constructeurs se font mutuellement concurrence en s'efforçant d'économiser l'énergie et de réduire l'impact négatif sur l'environnement.

Même si les véhicules électriques (VE) sont utilisés depuis le début de l'industrie automobile à la fin des années 1900 et au début des années 2000, ce n'est qu'avec l'arrivée de Tesla en 2003 que la révolution électrique à batterie a véritablement commencé. Cela a fourni une alternative viable aux efforts visant à décarboner le transport routier et a propulsé les véhicules électriques de 0,2 % des ventes de voitures neuves il y a dix ans à 13 % en 2022. Les ventes ont triplé entre 2018 et 2022 et devraient croître d'environ 30 % par an au cours de la prochaine décennie, représentant la moitié de toutes les ventes de voitures d'ici 2035. D'ici 2025, les ventes de véhicules électriques devraient atteindre près de 40 % en Europe et en Chine.

En ville, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites en incitant les gens à utiliser les transports publics plutôt que les voitures. Mais cela n'est possible que si les transports publics en question sont rapides et confortables, desservent toutes les parties de la ville, assurent la liaison entre centre-ville et banlieue, et offrent une alternative plus fiable et moins onéreuse aux voitures particulières. L'utilisation par les transports publics de moteurs au gaz, hybride ou électrique peut considérablement réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la qualité de l'air dans les villes.

Le covoiturage : partager son trajet en voiture

Le covoiturage désigne le transport d'autres personnes (y compris des étrangers) dans votre véhicule, en général pour des trajets réguliers (quotidiens).

C'est une bonne façon de réduire la pression sur les systèmes de transport dans les villes.

Le covoiturage est une pratique qui remonte aux années 1940, lorsque le gouvernement américain tentait d'économiser du carburant pour les besoins de la Seconde Guerre mondiale en demandant aux propriétaires de véhicules de transporter des passagers en cas de déplacement. Cette initiative a contribué à réduire la consommation de carburant, mais son impact a été limité, car la plupart des propriétaires de véhicules de l'époque étaient des gens aisés qui ne souhaitaient pas partager leur voiture avec des étrangers.

Dans les années 1970, la ville de Los Angeles a instauré des voies de circulation réservées aux covoitureurs. Aujourd'hui, ces voies existent dans toute l'Amérique du Nord ainsi qu'en Europe (elles sont signalisées par des panneaux routiers et un losange blanc sur la chaussée). Le covoiturage permet de réduire le nombre de véhicules sur les routes, de parer à la demande excessive de places de stationnement, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les gains pour les passagers sont évidents : ils dépensent moins en carburant, en réparation de véhicule et en stationnement.

Figure 3.2.13

Voies réservées au covoiturage aux USA

Vélo : le transport le plus écologique

Le vélo est le moyen de transport le plus écologique et le plus sain. Selon les scientifiques, une personne se rendant chaque jour à l'école ou au travail en vélo, plutôt que d'utiliser la voiture, économise une tonne d'émissions de gaz à effet de serre par an.

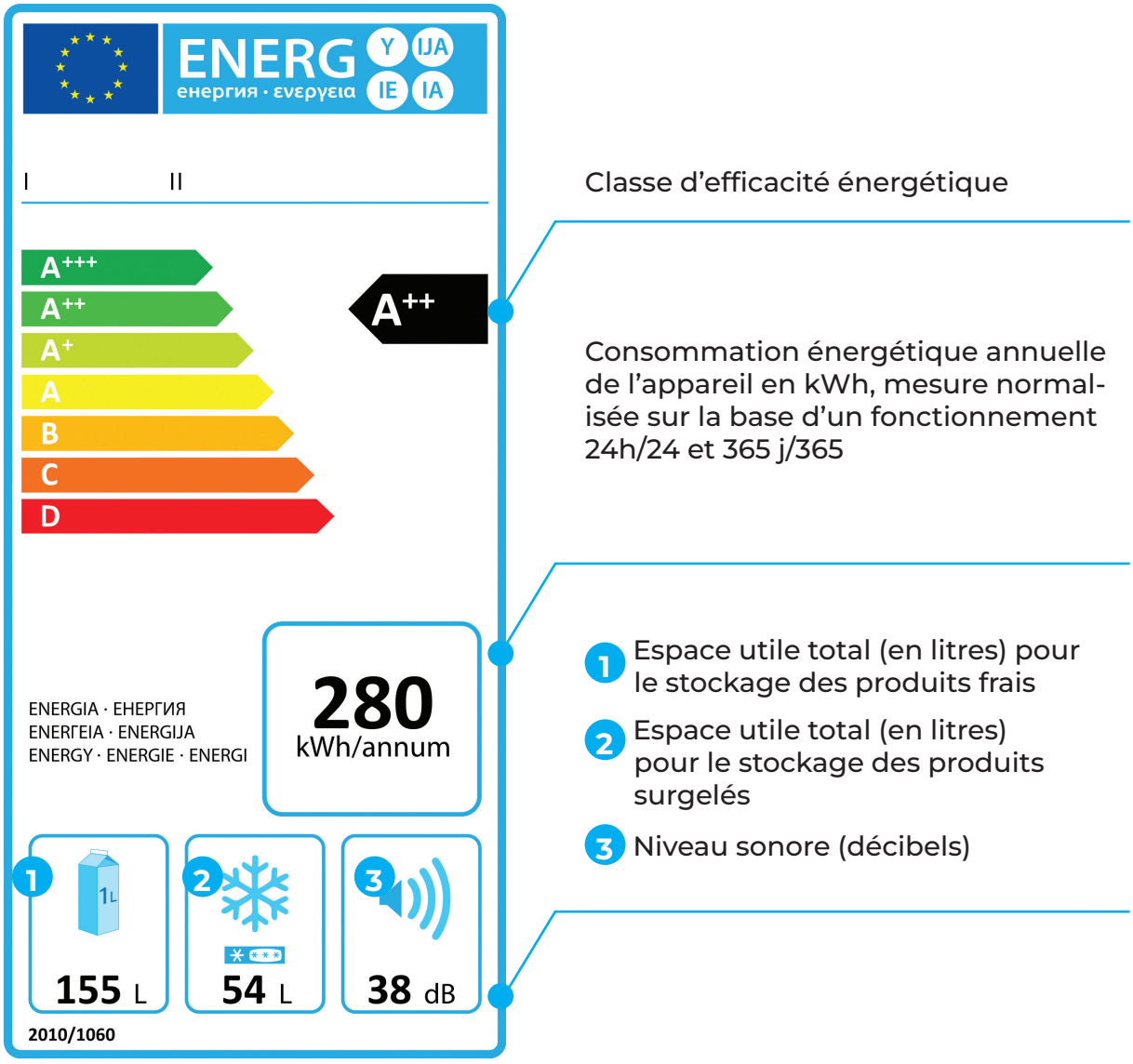
Le vélo est le moyen de transport privilégié aux Pays-Bas, au Danemark, en Norvège, en Suède et en Allemagne. À Copenhague, une personne sur trois se rend au travail en vélo. À Amsterdam, 40 % des gens utilisent quotidiennement le vélo, et la ville compte au total 400 km de pistes cyclables.

3.2.2 Appareils électroménagers et appareils électriques

De nombreux pays disposent d'un système particulier d'étiquetage des appareils électroménager en fonction de leur efficacité énergétique. Depuis 1995, l'étiquetage énergétique européen est obligatoire pour certains appareils électroménagers et certaines ampoules vendus dans l'Union européenne (Fig. 3.2.14).

Cet étiquetage tend à permettre aux consommateurs de comparer l'efficacité énergétique et d'autres critères de produits similaires fabriqués par un ou plusieurs fabricants. Les produits les plus économes en énergie sont ceux classés dans les catégories 'A' or 'A +', 'A++' et 'A+++'.

Figure 3.2.14 **Nouvel étiquetage relatif à l'efficacité énergétique pour les réfrigérateurs vendus dans l'Union européenne.**



Energy Star est un programme de certification lié à l'efficacité énergétique, lancé par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) en 1992 pour les écrans d'ordinateur à faible consommation énergétique. Les écrans répondant à certains critères d'efficacité énergétique obtiennent le label Energy Star, label obtenu aujourd'hui par 98 % des ordinateurs. L'utilisation du label a été étendue, par conséquent 65 autres types de produits, des appareils électroménagers aux bâtiments, sont désormais évalués à l'aide de ce programme (aujourd'hui aux USA, plus de 1,4 million de bâtiments et plus de 20 000 usines sont certifiées Energy Star).

Figure 3.2.15

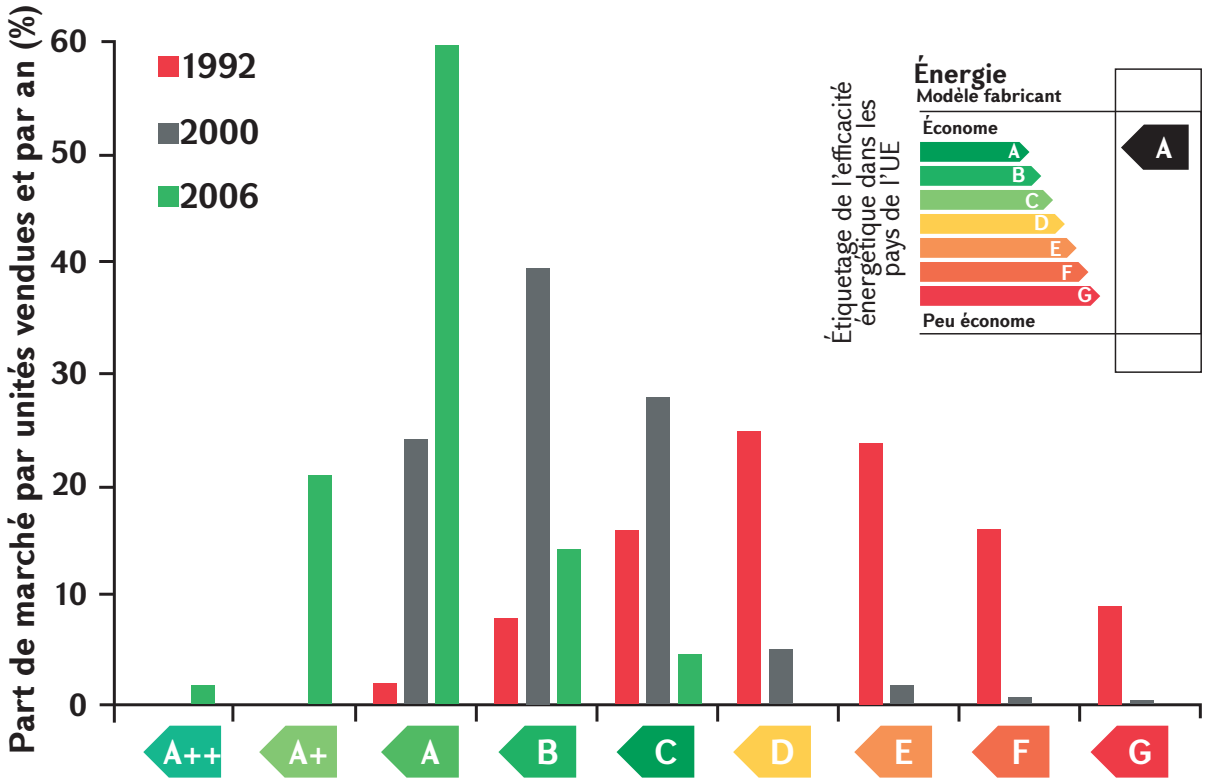
Le label américain Energy Star

Energy Star est l'un des programmes clés signalés par les États-Unis dans leur rapport sur l'ambition climatique 2022 (huitième communication nationale au titre de la CCNUCC), qui décrit les avancées de leur politique climatique dans le cadre de l'accord de Paris. Il a déclaré que depuis 1992, Energy Star et ses partenaires ont aidé les familles et les entreprises américaines à économiser cinq mille milliards de kWh d'électricité, à économiser plus de 500 milliards de dollars en coûts énergétiques et à réduire de quatre milliards de tonnes de gaz à effet de serre - l'équivalent de CO_2. Rien qu'en 2020, les économies ont abouti à une réduction des émissions de plus de 400 millions de tonnes de gaz à effet de serre équivalent CO_2, soit à peu près l'équivalent de plus de 5 % des émissions totales de gaz à effet de serre du pays.

De plus en plus de pays reconnaissent les avantages des normes d'efficacité énergétique et des programmes d'étiquetage pour réduire efficacement les factures d'énergie, stimuler l'innovation des produits, créer des emplois et réduire le coût des émissions de CO_2. De tels programmes pour les appareils et équipements fonctionnent désormais dans plus de 120 pays à travers le monde et constituent la pierre angulaire de la plupart des programmes nationaux d'efficacité énergétique et d'atténuation du changement climatique. De tels programmes fonctionnent depuis le plus longtemps aux États-Unis et dans l'UE où, selon les estimations de l'AIE, ils ont permis des réductions annuelles d'environ 15 % de la consommation totale actuelle d'électricité.

Un label d'efficacité énergétique ne se contente pas d'informer le consommateur de l'efficacité énergétique d'un appareil, mais l'informe également de ses capacités. Après tout, la principale fonction d'une machine à laver est de laver et rincer le linge, et sa capacité à économiser l'énergie est secondaire, bien qu'importante. Au cours de ces dernières années, les consommateurs ont été plus enclins à choisir des appareils et des technologies qui, en plus de s'acquitter parfaitement de leur fonction première, permettaient également d'utiliser moins d'énergie et de ressources, et donc d'économiser de l'argent (Fig. 3.2.16).

Figure 3.2.16 **Impact de l'étiquetage lié à l'efficacité énergétique et normes minimales d'efficacité énergétique applicables sur le marché européen des réfrigérateurs et congélateurs.**



L'impact d'un appareil électrique sur la santé est au moins aussi important que sa consommation énergétique. Il convient également de garder à l'esprit que les effets secondaires pourraient ne pas être immédiatement visibles : les risques pour la santé des nouvelles inventions ne pourraient n'être identifiés qu'après un certain temps. La découverte de tels problèmes ne signifie pas pour autant qu'une technologie ne peut être utilisée : une amélioration de la conception pourrait suffire à écarter le problème. Toutefois, nous devons aborder les nouvelles technologiques avec prudence : sans préjudice, mais avec précaution.

À titre d'exemple, la plaque à induction est un nouvel appareil ayant récemment gagné en popularité, simple à utiliser et très économique en termes de consommation énergétique, puisqu'elle se contente de chauffer le fond de la casserole et non tout l'espace autour. Cependant, les effets des champs magnétiques à courant de Foucault sur l'homme n'ont pas encore été convenablement étudiés.

.

3.2.3 Constructions écologiques : bâtiments actifs et passifs

Les gens ont des styles de vie différents – les ménages ne possèdent pas tous une voiture ou une panoplie complète d'appareils électroménagers. Mais tout le monde a besoin d'un toit au-dessus de sa tête. L'idée de construire un logement écoénergétique a donc toujours présenté un intérêt. Les cabanes de paysans en Europe et les tentes des peuples nomades ont été construites en utilisant un savoir-faire particulier, même si celui-ci ne s'est toujours pas vu attribuer d'appellation scientifique. Le foyer de masse, traditionnellement utilisé dans les foyers d'Europe de l'Est, d'Europe du Nord et d'Asie du Nord, constituait un parfait exemple d'efficacité énergétique (Fig. 3.2.7). Les épaisses parois retenaient la chaleur, tandis que la cheminée, avec ses différentes sections, extrayait la chaleur de la fumée avant de la laisser quitter la structure.

Figure 3.2.17

Constructions écologiques : bâtiments actifs et passifs

Plus récemment, en 1974, une forte hausse des prix du pétrole a rendu l'approvisionnement des bâtiments en énergie et en chaleur bien plus onéreux, incitant les architectes et les ingénieurs à revoir la conception des bâtiments. Les foyers ont commencé à utiliser de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement ainsi que des sources d'énergie alternatives. Des bâtiments de démonstration ont été construits afin de présenter ce qui pouvait être accompli, et les gouvernements de certains pays ont activement encouragé ce type de projets.

Le Conseil mondial du bâtiment durable a été officiellement créé en 2002 afin de faciliter la transition mondiale de l'industrie du bâtiment vers le développement durable. Le Conseil rassemble plus de 30 000 promoteurs immobiliers et entreprises de construction, établis dans 80 pays. Ses membres cherchent constamment de nouvelles façons de réduire la quantité de ressources nécessaires pendant toutes les étapes du cycle de vie d'un édifice : durant sa construction et son utilisation, lors de sa remise en état et, pour finir, lors de son démantèlement. La construction écologique s'efforce de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'eau, de réduire les déchets et de protéger les habitats naturels avoisinants. De tels édifices sont un peu plus chers à construire, mais l'investissement supplémentaire est rentabilisé au bout de 5 à 10 ans.

Les bâtiments à faible consommation énergétique sont dits « passifs » ou « actifs », en fonction de leur efficacité énergétique. Un bâtiment passif n'a pas nécessairement besoin de chauffage ou peut ne consommer qu'un dixième de l'énergie dont aurait besoin un bâtiment ordinaire. Un bâtiment actif, pour sa part, non seulement n'exige que très peu d'énergie, mais il produit également de l'énergie, voire même des surplus d'énergie, venant enrichir le réseau électrique central. On parle également de « bâtiment intelligent ». Cela signifie que le bâtiment en question analyse automatiquement sa consommation énergétique et effectue un contrôle automatique des différents systèmes consommant de l'énergie dans le bâtiment.

Figure 3.2.18

Plusieurs bâtiments à faible consommation énergétique ont été construits dans le quartier de Viiki à Helsinki (Finlande). Des panneaux solaires ont été installés en façade

Bâtiments passifs

L'un des principaux objectifs d'un bâtiment passif dans les pays du nord est de réduire les pertes de chaleur. Idéalement, une habitation passive est chauffée uniquement par la chaleur dégagée par les personnes qui y vivent et par les appareils électroménagers qui y sont utilisés. Si une source de chauffage supplémentaire est nécessaire, la préférence est accordée aux énergies renouvelables.

Les briques confectionnées à partir de matériaux recyclés sont souvent utilisées dans le cadre de la construction de telles habitations.

Les murs du bâtiment ne sont pas les seuls à nécessiter une isolation thermique, il en est de même pour les sols, les plafonds, les combles, le sous-sol, et même les fondations. Il est important de s'assurer que la conception évite ce que l'on appelle les « ponts thermiques » : petits détails et points de jonction au sein de la construction susceptibles de dissiper la chaleur d'un bâtiment généralement bien isolé. Ces techniques permettent de réduire de 20 fois la perte de chaleur d'un bâtiment !

Certificats environnementaux pour les bâtiments

Les normes de certification environnementale des bâtiments se sont généralisées ces dernières années. Les programmes les plus connus et les plus utilisés au monde sont le BREEAM (Royaume-Uni), le LEED (USA) et le DGNB (Allemagne).

Le programme de certification environnementale BREEAM a été élaboré en 1990, et plus de 200 000 bâtiments dans le monde ont, à ce jour, reçu une certification. Les critères de certification sont la qualité de la gestion du bâtiment, la santé et le bien-être de ses résidents, l'efficacité énergétique, les transports, l'eau, les matériaux, les déchets, l'utilisation de parcelles de terrain là où l'édifice est construit, et la pollution qu'il engendre.

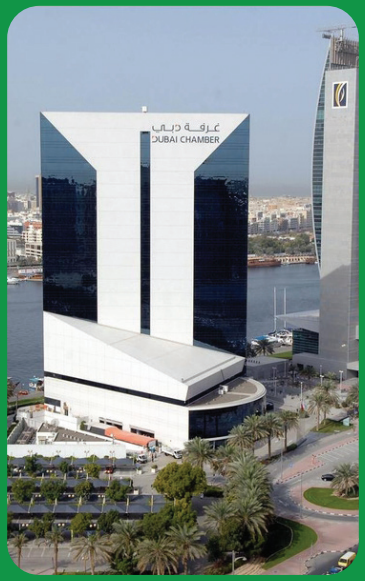
Le système de certification environnementale LEED a été conçu en 1998 en prenant en compte les critères suivants : le développement durable du site, l'efficacité de la consommation d'eau, l'efficacité énergétique, la pollution de l'air, les matériaux et les ressources, la qualité de l'environnement interne et les innovations. Les bâtiments peuvent obtenir quatre niveaux de certification : Certifié, Argent, Or et Platine, en fonction du nombre de critères qu'ils remplissent.

Le programme DGNB de certification environnementale, qui a été introduit en 2009, utilise un concept de planification intégrée afin d'évaluer les aspects écologiques, économiques, socioculturels et fonctionnels, ainsi que la localisation du bâtiment.

Premier bâtiment LEED Platine du Moyen-Orient

Initialement construit en 1995, le bâtiment abritant le siège social de la Chambre de commerce et d'industrie de Dubaï est un parfait exemple de la façon dont un bâtiment existant, à forte consommation d'eau et d'énergie, peut être transformé en gratte-ciel sain et écologique.

Entre 1998 et 2013, la consommation d'eau et d'énergie par personne dans le bâtiment a été réduite de 63 % et 92 % respectivement, soit une économie de près de 5,8 millions de dollars américains, grâce à des initiatives à faible coût ou sans frais. Après la rénovation, le bâtiment a obtenu le label Energy Star, ainsi que la certification LEED Platine.



Dans une habitation passive, la conception soignée des fenêtres est extrêmement importante : les fenêtres à double vitrage sont isolées hermétiquement, les vitres sont recouvertes d'un film spécial qui laisse entrer la lumière et la chaleur de l'extérieur, mais la retient lorsqu'elle tente de s'échapper de l'intérieur du bâtiment. Les fenêtres les plus grandes sont orientées dans la direction la plus exposée au soleil.

Le système de chauffage, de climatisation et de ventilation utilise plus efficacement les ressources que les bâtiments traditionnels. Par exemple, en hiver, l'air sortant du bâtiment est acheminé avec l'air qui y entre, dans un échangeur de chaleur spécial, de sorte que l'air chaud transfère sa chaleur à l'air froid. En été, l'air chaud de l'extérieur est acheminé sous terre où il est refroidi. Des principes similaires sont utilisés pour récupérer la chaleur de l'eau usée.

Bien sûr, même des bâtiments aussi bien pensés nécessitent parfois une source de chauffage ou de climatisation supplémentaire, mais il faudra beaucoup moins d'énergie pour atteindre les températures requises. Des conceptions aussi avancées renferment néanmoins certains problèmes : le conduit d'air doit être étroitement surveillé, l'accumulation de poussière, l'emploi de matériaux artificiels, ou d'autres défauts inhérents à la conduction pouvant affecter la qualité de l'air. Il est également essentiel que le mobilier présent dans ces bâtiments ne libère aucune substance nocive dans l'air.

Des cellules solaires et, au besoin, de petites éoliennes sont installées sur le toit. Le système d'éclairage le plus économique (LED) est utilisé, et il est également parfois possible d'éclairer le bâtiment au moyen de la seule lumière du soleil.

Combinés, ces dispositifs et bien d'autres permettent de réaliser des économies.

Des projets de construction d'habitations passives économes en énergie se multiplient. Selon les estimations, il semblerait que 120 000 immeubles de bureaux, boutiques, écoles et crèches, tous passifs, aient été construits dans le monde (notamment en Europe). Ce concept qui a d'abord été mis en œuvre uniquement en Allemagne ou dans des régions présentant des conditions climatiques similaires, a maintenant été adopté dans le monde entier, avec des critères d'applicabilité clairement définis pour différents climats.

Dans des conditions climatiques froides, le processus de conception vise généralement à minimiser les pertes de chaleur et à optimiser les gains solaires. Dans les climats plus doux, une isolation modérée, notamment des fenêtres aux performances améliorées, est suffisante, même si les performances du bâtiment en été nécessitent un examen plus attentif. Pour les climats plus chauds, les exigences d'isolation augmentent et les charges solaires à travers les fenêtres, les murs et les toits doivent être limitées. Dans les climats chauds et humides, les charges d'humidité doivent être minimisées. Des exemples de maisons passives dans des climats aussi variés que le Canada, les États-Unis, l'Allemagne, la Chine, la Grèce, l'Espagne, Taiwan, le Mexique et les Émirats arabes unis illustrent l'éventail des solutions possibles.

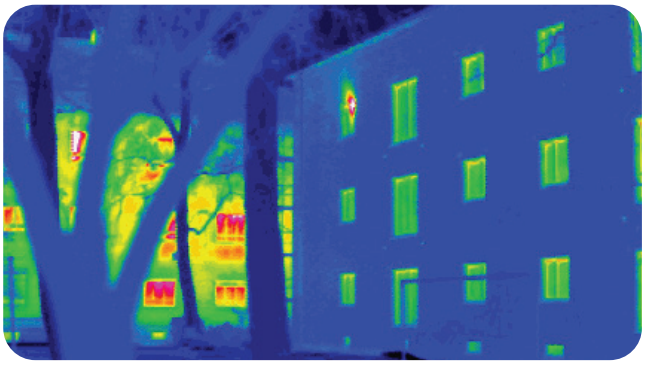


Figure 3.2.19

Une image infrarouge montre quelle peut être l'efficacité de l'isolation thermique d'une habitation passive (à droite) par rapport à une habitation traditionnelle (à gauche).

Résidence économe en énergie du Premier ministre britannique

Le 10-12 Downing Street est célèbre à Londres ccar c'est la résidence du Premier ministre britannique.
Ce bâtiment vieux de 300 ans a récemment fait l'objet d'un programme de modernisation et de rénovation progressive afin de devenir plus efficace sur le plan énergétique. Les initiatives écologiques introduites ont été les suivantes :

- éclairage contrôlé à l'aide de détecteurs de mouvements et de lampes à basse consommation,
- récupération de la chaleur des équipements informatiques pour chauffer l'eau.
- isolation thermique,
- installations à faible consommation d'eau,
- collecte de l'eau de pluie pour l'arrosage des jardins,
- système de gestion du bâtiment assurant le suivi des services,
- bois provenant de sources légales et durables,
- plus de 90 % des déchets de construction recyclés
- more than 90 % of construction waste recycled.

Grâce à son programme de rénovation, la résidence du Premier ministre britannique a déjà obtenu la notation « Très bien » du programme BREEAM.

Une école respectueuse du climat aux États-Unis

Le collège Sidwell Friends est parvenu à réduire sa consommation énergétique de 60 % et sa consommation d'eau de 90 %.

Des légumes cultivés par les élèves sur le toit de l'immeuble à l'aide de l'eau de pluie sont servis à la cantine. L'eau suffisamment potable n'est destinée qu'à la consommation.

L'établissement se trouve dans une région des États-Unis où il fait souvent très chaud, le bâtiment dispose donc de ses propres tours de refroidissement, qui contribuent à abaisser la température de l'air chaud extérieur avant qu'il ne pénètre à l'intérieur. La climatisation n'est utilisée dans les classes que lors des jours d'extrême chaleur.

Des systèmes optiques ont été installés afin de réguler la circulation de la lumière du soleil, en l'acheminant vers les pièces sombres du bâtiment. Les fenêtres exposées au soleil ont une teinte particulière afin de protéger l'intérieur du bâtiment de toute surchauffe.

Bâtiments actifs

Le bâtiment actif intègre certains concepts du bâtiment passif, comme l'isolation ou l'exposition solaire optimale des fenêtres. Cependant, il favorise également les systèmes à énergie renouvelable, comme les chauffe-eau solaires et/ou les pompes à chaleur géothermiques. Le premier bâtiment actif en matière d'économie d'énergie a été construit au Danemark, pays qui dispose même d'un site Internet dédié aux bâtiments actifs : www.activehouse.info. Un projet de directive européenne de 2023 qui réglemente la performance énergétique des bâtiments appelle à ce que tous les nouveaux bâtiments soient neutres en émissions à partir de 2030, dans le but d'avoir un parc immobilier neutre en émissions d'ici 2050. Cela signifie que ces bâtiments doivent avoir des caractéristiques qui sont celles à la fois des bâtiments passifs et des bâtiments actifs.

Habitation active au Danemark

« Home for Life' » au Danemark constitue un exemple d'habitation active neutre en CO_2. Elle produit 9 kWh/m² d'énergie par an, soit plus qu'elle n'en consomme. Une pompe à chaleur solaire et 7 m² de capteurs solaires permettent de produire de l'énergie à des fins de chauffage et de production d'eau chaude, tandis que 50 m² de cellules solaires produisent de l'électricité. Des fenêtres allant du sol au plafond couvrent 40 % de la façade, soit deux fois la superficie d'une habitation traditionnelle. Elles permettent d'éclairer et de chauffer les pièces grâce aux rayons du soleil. Toutes les pièces sont équipées de capteurs qui enregistrent la température, les niveaux de CO_2 et le taux d'humidité, et un système de contrôle intelligent permet de s'assurer que le logement s'adapte à l'exigence d'un climat intérieur sain et confortable. Des mécanismes d'ouverture automatique des fenêtres laissent entrer l'air frais, tandis que des capteurs éteignent la lumière lorsque vous quittez la pièce.

Des systèmes optiques ont été installés afin de réguler la circulation de la lumière du soleil, en l'acheminant vers les pièces sombres du bâtiment. Les fenêtres exposées au soleil ont une teinte particulière afin de protéger l'intérieur du bâtiment de toute surchauffe.

3.2.4 Les villes vertes

On compte de nombreux exemples d'utilisation de technologies économes en énergie dans les bâtiments du monde entier et, plus récemment, les populations ont commencé à mettre en place des projets de plus grande envergure, à l'échelle urbaine. L'un des projets les plus ambitieux est la création de villes entièrement écologiques. Imaginez toute une ville conçue en harmonie avec l'environnement, dont les habitants ne consomment que les ressources dont ils ont réellement besoin, et font tout ce qui est en leur pouvoir pour protéger le milieu naturel. L'ensemble de l'énergie de la ville est produit à l'aide de sources d'énergie renouvelable. Les déchets sont recyclés et réutilisés. Les habitants de cette ville sont pleinement conscients de l'importance de prendre soin de la planète et de chacun, et vivent en paix et en harmonie les uns avec les autres.

Une partie de plus en plus grande de la population mondiale souhaite voir ces rêves se réaliser, par conséquent, la conception des villes vertes fait l'objet d'une réflexion plus importante. Ces villes ont un air et une eau purs. Les déchets et les eaux usées sont recyclés et réutilisés. Les toits sont utilisés aux fins de jardinage ou d'installation de panneaux solaires, et possèdent des réservoirs visant à recueillir l'eau de pluie. Des technologies d'habitations actives et passives sont utilisées lors de la construction des bâtiments résidentiels, publics et commerciaux.

Il est impossible de rendre toutes les villes écologiques en un claquement de doigt, cependant ce rêve devient petit à petit une réalité partout dans le monde.

SamsØ, Denmark

Les habitants de l'île danoise de Sams sont autonomes en matière d'énergie grâce à l'utilisation des énergies renouvelables, et parviennent même à vendre un peu de l'énergie qu'ils produisent. Dix ans ont été nécessaires pour parvenir à ce résultat, de même que des investissements à hauteur de 80 millions de dollars américains, néanmoins cet argent a déjà été remboursé par les ventes d'électricité. Les habitants de l'île ont installé 10 éoliennes à terre et 11 en mer, lesquelles produisent au total 28 GWh d'énergie chaque année.

Le chauffage fourni sur l'île provient de sources de biomasse renouvelables : de la chaume, de la sciure et d'autres déchets végétaux sont brûlés dans des chaudières industrielles.

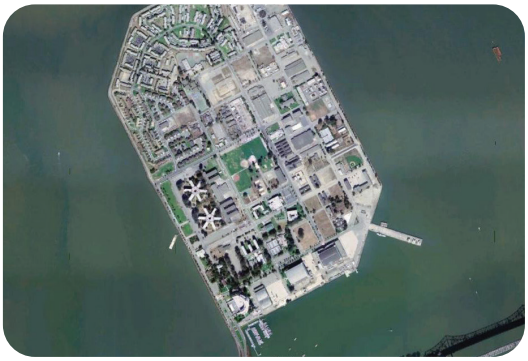
L'île possède une superficie de 114 km^2, et s'étend sur une longueur de 50 km du nord au sud, et une largeur de 20 km à son point le plus large. Elle compte 4 000 habitants, dont la plupart travaillent dans l'agriculture. Le village le plus grand, Tranebjerg, compte seulement 800 habitants, qui cependant se considèrent fièrement des citadins.

Masdar City (Émirats arabes unis)

Masdar City (« masdar » signifiant « source » en arabe) est une nouvelle ville écologique située aux Émirats arabes unis (EAU). Elle se trouve dans l'émirat d'Abou Dhabi, à 17 km de la capitale et près de l'aéroport international.

L'idée de construire une ville écologique en plein désert a été émise par le gouvernement d'Abou Dhabi. Le projet, d'un budget total de 22 milliards de dollars américains, a été lancé en 2006. Cette nouvelle ville devrait accueillir entre 40 000 et 50 000 habitants, et environ 60 000 de plus viendront y travailler chaque jour. La plupart des sociétés et des usines qui y seront implantées seront spécialisées dans le développement et la production de produits et de technologies respectueuses de l'environnement. Le transport en voiture n'est pas autorisé à Masdar City : les résidents se déplaceront à pied, en vélo, en transport public ou en utilisant les nouveaux taxis contrôlés par ordinateur. Un haut mur d'enceinte est en construction autour de la ville afin de la protéger du vent chaud du désert, et ses rues bénéficieront de vastes espaces ombragés. Masdar City est destinée à être une plaque tournante pour les entreprises de technologies propres. Le Masdar Institute of Science and Technology opère dans la ville depuis septembre 2010. La ville abrite également le siège social de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA).

L'expérience de Masdar City illustre à quel point la vie durable comporte ses difficultés et ses défis. Des scooters électriques aux véhicules verts autonomes en passant par les technologies du futur, la ville présente non seulement ses solutions pour faciliter la vie de manière durable, mais aussi des choix intelligents qui mènent à un monde meilleur.



Treasure Island (San Francisco, Californie, USA)

Treasure Island est une île artificielle créée en Californie en 1939 dont l'objectif premier était d'accueillir un nouvel aéroport. Ces plans ont été modifiés avec le déclenchement de la Seconde Guerre mondiale, et l'île a donc servi de base militaire jusqu'en 1996. Treasure Island est désormais utilisée comme site d'essai pour une communauté urbaine hautement durable qui tirera plus de 50 % de son énergie de sources renouvelables telles que des panneaux solaires sur les toits et des éoliennes.

Les citoyens pourront acheter des fruits et légumes dans une ferme biologique de l'île, toutes les voitures seront respectueuses de l'environnement et les bâtiments seront économes en énergie. Les bâtiments de l'île sont certifiés selon la norme d'efficacité énergétiqueLEED.

Sherford (Angleterre)

Sherford en Angleterre est une nouvelle ville écologique de style anglais traditionnel. Le projet a été lancé en 2015 et bénéficie du soutien du roi Charles III. Tous les bâtiments de Sherford seront construits à partir de matériaux respectueux de l'environnement, produits en Angleterre et à une distance maximale de 80 km du site de construction. Une telle démarche permettra de réduire l'empreinte carbone liée aux travaux de construction, car il ne sera pas nécessaire de transporter les matériaux sur de longues distances, en émettant des gaz à effet de serre issus de la combustion de carburant.

Sherford suivra l'urbanisation traditionnelle pour rendre la ville neutre en carbone en construisant des bâtiments économes en énergie et en aménageant la ville de manière à ce que les gens vivent à proximité d'une rue principale. Cela permet de se déplacer facilement et rapidement à pied et à vélo, de sorte que les habitants n'auront pas besoin de transports en voiture dans certaines parties de la ville. L'espace sur les toits sera également utilisé pour des panneaux solaires et pour la culture de plantes. Environ un quart des logements seront « à bas prix » en raison de l'écart important entre les prix des logements et les salaires dans la région.

La ville de Vancouver, Canada

La ville de Vancouver au Canada est reconnue comme l'une des villes les plus respectueuses de l'environnement d'Amérique du Nord. La ville a adopté le plan ambitieux de devenir la ville la plus écologique du monde. Ce plan, élaboré par les autorités municipales en collaboration avec la population locale, prévoit des mesures comme un passage à 100 % vers l'électricité d'origine renouvelable d'ici 2050, un programme zéro déchet, l'extension du réseau de rues piétonnes et de pistes cyclables, le développement de bâtiments et de transports publics écologiques, le développement des espaces verts, ainsi que l'augmentation du nombre de marchés fermiers et de jardins communautaires. En outre, l'administration de la ville a constitué un fonds de deux millions de dollars américain, intitulé « Greenest City Fund », en collaboration avec la Vancouver Foundation, afin de soutenir les projets communautaires verts destinés à la ville de Vancouver. Avec la mise en place de toutes ces mesures, la ville de Vancouver espère, d'ici 2050, réduire les émissions de gaz à effet de serre locales de 80 % par rapport aux niveaux enregistrés en 2007.

QUESTIONS

1. A quel moment de la journée observe-t-on un pic de consommation électrique ?
2. Selon vous, les pays chauds devraient-il se préoccuper des économies d'énergie ?
3. Comment une ville doit-elle être aménagée pour devenir « écologique » ?
4. Selon vous, quelle partie de votre maison perd le plus de sa chaleur en hiver et de sa fraîcheur en été ? Comment éviter cela ?
5. Quelle est la différence entre bâtiment « passif », « actif » et « intelligent » ?

EXERCICES

1

Demandez à vos parents de vous montrer les factures d'électricité de votre maison ou de votre appartement pour l'année écoulée, notez combien de kilowatts-heures ont été consommés et tracez un graphique.

Déterminer la consommation électrique de vos principaux appareils électroménagers : réfrigérateur, lave-linge, aspirateur, télévision, lampes, etc. Pour ce faire, vous pouvez : 1) trouver la puissance de chaque appareil sur sa fiche technique ; 2) calculer grossièrement combien d'heures par jour l'appareil fonctionne ; 3) multiplier cette durée par le nombre de jours dans le mois ; 4) multiplier la puissance de l'appareil par sa durée de fonctionnement.

Tracez un second graphique sur la même feuille de papier, résumant la consommation électrique totale de vos appareils électroménagers. Analysez le graphique, déterminez quels appareils consomment le plus et pourquoi. Avec vos parents, réfléchissez à ce que vous pourriez faire pour réduire votre consommation énergétique.

2

Dessinez une grande carte de la ville respectueuse de l'environnement où vous aimeriez vivre. Comment s'appellera-t-elle ? Dans quelle partie du monde se trouvera-t-elle ?

Comment ses rues seront-elles aménagées ? Les véhicules à moteur seront-ils autorisés à parcourir la ville ? Quelles seront les sociétés et les industries (s'il en est) qui y seront implantées ?

Où se trouvera le quartier résidentiel et pour quelle raison ? Dessinez ce à quoi votre habitation ressemblera dans cette ville. De quel type de bâtiment s'agira-t-il et en quoi sera-t-il construit ? Écrivez une rédaction à ce sujet.

3

Renseignez-vous sur les initiatives écologiques des différentes villes du monde en consultant la page « Ville durable » de Wikipedia et d'autres ressources en ligne. Trouvez des informations détaillées sur la situation actuelle d'une ville écologique donnée, et faites le point en classe sur cette ville.

3.3 L'empreinte carbone et comment puis-je aider la planète en réduisant mon empreinte carbone

3.3.1 L'empreinte carbone

Toute activité humaine utilisant de l'énergie a une incidence sur le climat.

Nous conduisons des voitures, voyageons en avion vers d'autres villes et pays, regardons la télévision et utilisons des ordinateurs, cuisinons nos repas et mettons nos aliments au réfrigérateur. Nous abattons des forêts pour fabriquer du papier et des meubles. Nous allumons le chauffage en hiver et l'air conditionné en été, et nous éclairons à l'électricité dans nos foyers tout au long de l'année. En faisant tout cela, nous laissons chacun notre propre empreinte carbone.

L'empreinte carbone d'une ville ou d'un pays correspond à la quantité totale de gaz à effet de serre que l'ensemble des personnes et des entreprises de cette ville ou de ce pays produisent dans le cadre de leurs actions, des événements auxquels elles participent et des produits qu'elles consomment directement ou indirectement.

Figure 3.3.1 Exemples de sources d'émission de gaz à effet de serre

Adopter un comportement respectueux de l'environnement implique de réfléchir à la manière de réduire ses émissions de gaz à effet de serre et son empreinte carbone.

C'est une pratique courante de traduire toutes les émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO_2 afin de faciliter la compréhension et les calculs. Cette quantité est exprimée en unités d'équivalent CO_2.

Empreinte carbone

- Courrier électronique – 4 g
- Le même message avec une pièce jointe volumineuse – 50 g
- Un sac en plastique – 10 g
- Une bouteille d'eau de 0,5 litre (production locale) – 110 g
- Une bouteille de taille moyenne – 160 g
- Une glace – 500 g
- Un jean – 6 kg

Les émissions directes correspondent à la quantité de dioxyde de carbone résultant de l'utilisation de combustibles fossiles. Par exemple, la quantité de gaz à effet de serre émise dans le cadre de l'exploitation d'une usine ou de l'utilisation d'un véhicule motorisé.

Les émissions indirectes correspondent à la quantité de CO_2 relâchée dans l'atmosphère dans le cadre de la production et du transport d'énergie nécessaires à la fabrication des produits que vous achetez et des services dont vous avez besoin. Cette partie de l'empreinte carbone est celle sur laquelle nous pouvons influer : nous pouvons réfléchir à deux fois et décider de ne pas acheter de gobelets jetables, réfléchir à deux fois et marcher au lieu de nous déplacer en voiture, réfléchir à deux fois et ne pas utiliser le lave-linge à demi-charge.

Calculer l'importance de notre empreinte carbone (notamment les émissions indirectes) est une tâche difficile, car nous devons prendre en compte nombre de facteurs différents et trouver un grand nombre d'informations. En outre, l'empreinte carbone d'un produit sera toujours la même pour le producteur, mais sera différente pour les différents consommateurs, car les frais de transport et autres coûts de livraison du produit au consommateur doivent être pris en compte.

À titre d'exemple, l'empreinte carbone d'une pomme de jardin, consommée au pied de l'arbre sur lequel elle a poussé, s'élève à 0 g de CO_2. Si vous achetez des pommes cultivées dans votre région en saison (c.-à-d. en été et au début de l'automne), l'empreinte carbone d'une pomme s'élève à 10 g de CO_2. L'empreinte carbone d'une pomme importée (par exemple, une importée d'Italie) s'élèvera à 150 g de CO_2.

Les entreprises soucieuses de leur responsabilité environnementale compensent leur empreinte carbone en plantant des arbres et en obtenant des certificats auprès d'entreprises de compensation carbone réputées.

Les produits ou services ayant des émissions de CO_2 faibles ou nulles, ou dont les émissions ont été compensées, peuvent recevoir un étiquetage bas carbone ou neutre en carbone pour démontrer leur respect du climat. Un tel étiquetage influence le choix des consommateurs en faveur de ce produit ou service particulier.

Exemples de labels « carbone neutre » :

3.3.2 Comment puis-je aider la planète ? En réduisant votre empreinte carbone

Les gaz à effet de serre influent sur le climat de la planète, et nos habitudes conditionnent les émissions de gaz à effet de serre. Voyons comment réduire notre empreinte carbone et aider la planète.

Température intérieure et températures confortables

Dans les pays du nord, la quasi-totalité des bâtiments ont besoin de chauffage et d'isolation thermique. La plupart des systèmes de chauffage équipant les bâtiments anciens ont été installés au moment où les prix de l'énergie thermique étaient bas et où l'efficacité énergétique n'était pas une priorité. Dans bon nombre de villes, l'énergie thermique est produite par la combustion de gaz ou de charbon, ce qui provoque des émissions de gaz à effet de serre qui affectent le climat.

D'autres solutions permettent de produire de l'énergie thermique, comme les capteurs solaires et les pompes à chaleur, cependant ces technologies restent onéreuses et ne sont pas évidentes à installer pour un immeuble résidentiel ancien composé de plusieurs étages.

La solution la plus simple est d'améliorer l'isolation thermique. Les déperditions de chaleur dépendent de deux facteurs : la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, et les propriétés thermo-isolantes des murs, plafonds, fenêtres et sols. Les bâtiments perdent une grande partie de leur chaleur par le système de ventilation. Les déperditions de chaleur peuvent également être dues à des vices cachés, des erreurs de conception, une mauvaise qualité de la construction, et le vieillissement du bâtiment et des matériaux d'isolation thermique. Il est possible de déterminer si les murs, les plafonds et les fenêtres retiennent bien la chaleur et d'identifier toute fuite de chaleur au moyen de l'imagerie thermique, laquelle est réalisée à l'aide d'une caméra particulière indiquant la répartition de la température sur toute surface, comme le mur d'une habitation. La répartition de la température apparaît sur l'écran (et est enregistrée dans la mémoire) de la caméra sous différentes couleurs, chaque couleur correspondant à une température donnée. À côté de l'image se trouve systématiquement une échelle indiquant la correspondance entre les couleurs apparaissant sur l'image et les gammes de températures spécifiques.

La déperdition de chaleur la plus importante dans tout bâtiment préfabriqué se situe au niveau des joints, entre les panneaux muraux extérieurs. Le seul remède (sauf démolition) est une réparation complète de la façade à l'aide des derniers enduits retenant la chaleur. La qualité d'installation des fenêtres peut être décisive en ce qui concerne les niveaux de déperdition de chaleur, y compris dans les bâtiments neufs et rénovés.

Figure 3.3.2

Un immeuble résidentiel de cinq étages datant des années 1960 « luit » aux endroits où la chaleur s'échappe, à savoir les joints situés entre les panneaux préfabriqués

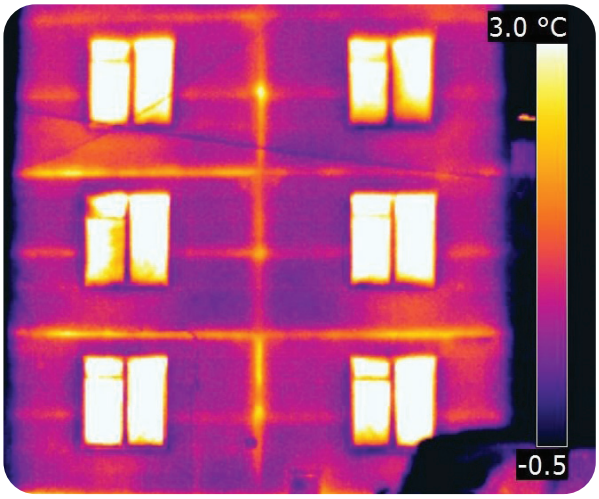


Figure 3.3.3

Les déperditions de chaleur à l'angle de ce bâtiment en briques sont conséquentes à la jonction entre le vitrage des balcons et le mur, et également à la jonction entre les plafonds et les murs

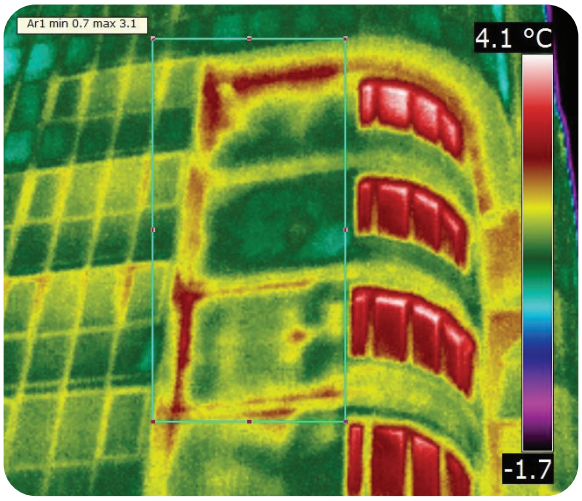
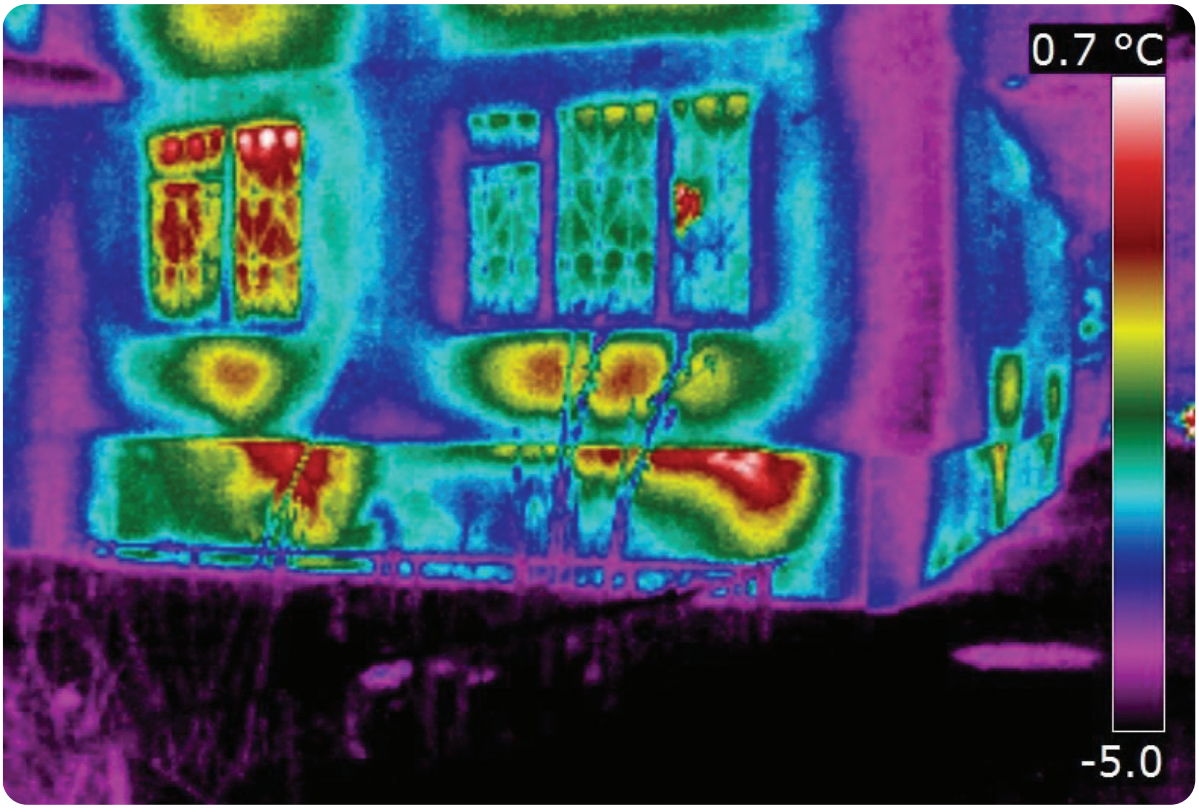


Figure 3.3.4

Les points rouges correspondent aux emplacements des radiateurs muraux installés dans ce bâtiment résidentiel ancien.



Isolation thermique des appartements

Les options permettant d'économiser de l'énergie en améliorant l'isolation thermique des appartements vont du remplacement des fenêtres par des fenêtres modernes à double et triple vitrage à de meilleures portes, en passant par une meilleure isolation des murs, des sols et des plafonds et le remplacement des radiateurs de chauffage par des radiateurs plus efficaces

- Les fenêtres modernes, faites de plastique ou de bois, offrent une excellente protection contre le froid. Elles sont faciles à entretenir et à manipuler.
- Si vous ne pouvez pas remplacer vos fenêtres par des fenêtres plus modernes, faites de votre mieux pour assurer leur isolation. Passez une bougie ou une plume le long de l'encadrement afin d'identifier tout courant d'air éventuel, et colmatez les brèches à l'origine de ces courants d'air. La meilleure période de l'année pour le faire est l'automne, car l'enduit ne tiendra pas correctement si les températures sont trop élevées ou trop basses. Assurez-vous que l'encadrement est sec avant de l'appliquer.
- Calfeutrez vos fenêtres pour l'hiver. L'un des avantages des systèmes d'isolation modernes est que l'on peut toujours ouvrir et fermer les fenêtres, même après l'installation de systèmes de calfeutrage.
- Si vous éprouvez toujours des difficultés à conserver la chaleur de la pièce, installez d'épais rideaux au niveau des fenêtres.
- Vous pouvez acheter un film thermo-réfléchissant à coller à l'intérieur des doubles vitrages afin de renvoyer la chaleur à l'intérieur de l'appartement. Certains de ces films peuvent être retirés en été. Néanmoins, le film ne laisse entrer que 80 % de la lumière du jour dans la pièce, ce qui peut être un inconvénient majeur pour les appartements qui manquent de lumière (p. ex. ceux situés en rez-de-chaussée, ou exposés au nord, ou disposant d'un balcon surplombé par l'étage du dessus, ou ombragé). Il convient toutefois de peser le pour et le contre : les adultes sont rarement chez eux durant les heures de jour en hiver, et les enfants sont à l'école ou ailleurs, la pose d'un film réfléchissant peut donc représenter un avantage considérable.
- Si la porte d'entrée laisse entrer le froid, la meilleure des choses à faire est de la remplacer, en prenant bien soin de faire appel à un bon installateur. Le choix de la porte n'est pas le plus compliqué, toutefois la qualité de son installation est ce qui fait toute la différence en matière de réduction des déperditions de chaleur et également d'isolation phonique.
- Si vous ne pouvez pas changer la porte, vous pouvez améliorer son isolation en apposant sur celle-ci un panneau de polystyrène ou un autre matériau isolant, et en le recouvrant de cuir synthétique. Vous devez également colmater les espaces sous la porte, qui favorisent les déperditions de chaleur, en installant une bande de calfeutrage ou en surélevant le seuil de l'entrée.
- S'il fait froid à l'intérieur d'un bâtiment, cela signifie que les murs ont besoin d'être isolés. L'isolation des murs extérieurs peut être améliorée à l'aide de la méthode « façade humide » : un isolant thermique (à base de minéraux ou laine de verre) est fixé au mur et est peint ou recouvert de plâtre.

- Une autre manière de conserver la chaleur consiste à aménager soigneusement la pièce. Placez les armoires le long des murs froids : elles feront office de barrière naturelle contre le froid pénétrant dans la pièce. Les meubles présents dans la pièce ne doivent pas entraver la circulation de l'air chaud, évitez donc de placer des meubles près des radiateurs.
- Le moyen le plus simple et le moins onéreux d'isoler le sol est d'installer du linoléum sur une sous-couche de feutre. N'utilisez pas de colle, ou le feutre perdra ses propriétés isolantes. Vous pouvez également poser un film ou un matériau isolant sous tout revêtement de sol.
- La manière la plus évidente d'améliorer la qualité de chauffage d'une pièce consiste à remplacer les anciens radiateurs par des radiateurs bimétalliques récents. Cela doit être fait avant le début de la saison de chauffage. Lors de l'achat de nouveaux radiateurs, veillez à les choisir avec thermostat.
- Si le remplacement n'est pas possible, les anciens radiateurs peuvent être utilisés de manière plus efficace. Retirez l'ancienne peinture, poncez la surface et peignez-les avec des couleurs sombres : une surface sombre et lisse fournit 5 à 10 % de chaleur en plus. Vous pouvez également peindre une feuille de contreplaqué en argent ou la recouvrir d'une feuille métallique, et la placer derrière le radiateur pour renvoyer la chaleur vers la pièce plutôt que de chauffer les murs. Il convient également de conserver des radiateurs exempts de poussière, car celle-ci empêche le transfert de chaleur. Assurez-vous que les rideaux et les meubles n'entravent pas le flux de chaleur entre le radiateur et la pièce.
- Ne surchauffez pas la pièce ! Portez quelque chose de plus chaud plutôt que de surchauffer.
- Lorsque vous aérez l'appartement, faites-le rapidement et complètement : ouvrez grand les fenêtres et les portes pour faire circuler l'air.

Cuisine

Votre cuisinière électrique est l'appareil le plus puissant de votre maison : avec toutes les plaques et le four allumés, celle-ci peut consommer jusqu'à 20 kilowatts d'énergie, ce qui est 10 fois plus qu'une bouilloire électrique ou un fer à repasser.

- N'oubliez pas que le fond des casseroles et des poêles que vous utilisez sur votre cuisinière doit être lisse et épais. Cela peut prendre jusqu'à 40 % de temps en plus pour cuire des aliments dans une casserole à fond inégal ou concave.
- La casserole doit être de la même taille que la plaque, afin d'éviter toute perte de chaleur.
- Utilisez un couvercle ! La consommation d'énergie est 2,5 fois plus élevée lorsque vous cuisinez dans un plat non couvert.
- Sur une cuisinière électrique, vous pouvez généralement éteindre la plaque cinq minutes avant que les aliments soient prêts : la chaleur résiduelle terminera le processus de cuisson.
- Certains appareils électroménagers spéciaux (cafetières, autocuiseurs, multicuiseurs) peuvent préparer des aliments en utilisant 30 à 40 % d'énergie en moins qu'une cuisinière ordinaire, en moitié moins de temps.
- Si vous versez de l'eau sur les céréales quelques heures avant de cuisiner un porridge, celui-ci sera plus rapide à préparer et contiendra davantage de vitamines. Le sarrasin peut être mis à tremper pendant environ une heure, le riz pendant un peu plus longtemps, et les haricots ou les pois pendant une nuit entière. Cela vous fera gagner du temps – si les aliments cuisent plus rapidement, vous n'aurez pas à les surveiller pendant trop longtemps.
- N'utilisez pas trop d'eau lorsque vous faites bouillir des aliments.
- Ne remplissez pas entièrement la bouilloire si vous n'avez besoin d'eau que pour une tasse.

Réfrigérateurs

Le réfrigérateur est l'appareil électroménager le plus énergivore de votre maison, et le montant de votre facture d'électricité dépend largement de sa qualité de fabrication et de la manière dont vous l'utilisez.
Un réfrigérateur récent consomme trois à cinq fois moins d'énergie qu'un modèle de même taille fabriqué il y a 20 ans, avec les mêmes caractéristiques, notamment lorsque les anciens joints ont perdu de leur étanchéité, de sorte que de l'air chaud entre dans le réfrigérateur. Pour un foyer économe d'une ou deux personnes, l'acquisition d'un nouveau réfrigérateur peut contribuer à diviser la facture d'électricité par 1,5

- Avant d'ouvrir le réfrigérateur, réfléchissez à ce dont vous avez besoin à l'intérieur. Quelques secondes à peine suffisent pour que l'air chaud de la pièce remplace l'air froid à l'intérieur du réfrigérateur.
- Si le réfrigérateur est grand, il est recommandé de le remplir de pots divers et variés : lorsque vous ouvrez le réfrigérateur, de l'air chaud remplace rapidement l'air froid, mais si le réfrigérateur est plein, alors l'air chaud pourra moins facilement y entrer
- Ne mettez jamais d'aliments au réfrigérateur s'ils sont encore chauds ! Installez le réfrigérateur aussi loin que possible des radiateurs, de la cuisinière et de la lumière directe du soleil.
- Assurez-vous que les récipients contenant des aliments sont recouverts lorsque vous les mettez au réfrigérateur afin que l'humidité ne s'évapore pas et ne s'accumule pas sur les parois du réfrigérateur.
- Si le réfrigérateur a besoin d'être dégivré manuellement, veillez à le faire régulièrement.

Éclairage

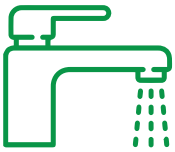
Vous pouvez réaliser des économies d'énergie allant jusqu'à 40 % en utilisant des équipements d'éclairage modernes et en appliquant quelques conseils pratiques.

- Un éclairage d'appoint de notre zone de travail ou de lecture est souvent bien plus efficace qu'un puissant éclairage de plafond. Utilisez des lampes et appareils d'éclairage portatifs.
- Une surface blanche et lisse reflète 80 % de la lumière dirigée vers elle, tandis qu'une surface vert foncé n'en reflète que 15 %, et une surface noire seulement 9 %. Lors du choix des meubles, du papier peint et des rideaux d'une pièce, privilégiez les couleurs claires.
- Il existe une manière très simple et très efficace d'améliorer la qualité de votre éclairage : dépoussiérez régulièrement les ampoules et les fenêtres.
- La majeure partie de la lumière du jour entre dans une pièce par la partie supérieure de la fenêtre, il est donc particulièrement important de pas l'en empêcher.

Appareils électroménagers

La consommation d'énergie peut être réduite en apprenant comment faire un meilleur usage des appareils électroménagers.

- Lors de l'achat d'un équipement audio, vidéo ou informatique, privilégiez un modèle à faible consommation énergétique. Bien sûr, les décisions d'achat du foyer appartiennent aux parents, mais vous pouvez toujours les aider à trancher en leur communiquant ce que vous savez – ils en tiendront peut-être compte.
- Éteignez tous les appareils électriques lorsque vous ne les utilisez pas. Lorsque vous éteignez la télévision à l'aide d'une télécommande, celle-ci passe en mode « veille », ce qui consomme moins d'électricité, mais en consomme toujours.
- Ne laissez pas les chargeurs de téléphones branchés en permanence.
- Utilisez des rallonges de première qualité, avec un cordon large. Les cordons étroits auront tendance à chauffer, ce qui signifie que l'électricité sera perdue sous forme de chaleur plutôt que d'alimenter vos appareils.



Consommation d'eau

Les actions liées à la consommation d'eau permettent d'économiser à la fois de l'énergie et de l'eau.

- Privilégiez les douches aux bains, qui ne doivent être qu'occasionnels
- 10 gouttes par minute qui s'écoulent du robinet correspondent à 263 litres d'eau par an. Réparez les robinets qui fuient.
- Il existe différents types de robinets. Les robinets à rondelles de caoutchouc sont susceptibles de fuir plus souvent, toutefois, cette petite pièce de caoutchouc est facile à remplacer. Les robinets en céramique ou à poignées sphériques peuvent durer très longtemps, mais uniquement si la canalisation qui achemine l'eau jusqu'à eux est dotée de filtres, car les parties polies de ces robinets sont très sensibles aux particules de rouille présentes dans l'eau. Les robinets en céramique doivent être fermés délicatement. Les robinets thermostatiques, qui ont récemment fait leur apparition sur le marché, sont plus onéreux, mais ils permettent d'ajuster la température de l'eau rapidement et avec précision, ce qui réduit les dépenses inutiles.
- Prenez l'habitude de fermer le robinet lorsque vous n'avez pas besoin que l'eau coule en continu. Certains foyers épluchent les pommes de terre et font la vaisselle sous l'eau du robinet, toutefois ces tâches peuvent être acquittées simplement en utilisant des bassines et seaux. Il est plus facile de laver la vaisselle en une fois, puis de la rincer en une fois. Les éviers récents sont souvent dotés de bouchons. Vous pouvez donc utiliser l'évier lui-même comme bassine.

Lavage et repassage

Réduire les émissions liées au lavage et au repassage peut contribuer à économiser de l'énergie, des émissions, du temps et à conserver vos vêtements plus longtemps..

- Lorsque vous lavez le linge à la machine, il n'est pas nécessaire de régler la température sur 90 °C et de lancer un cycle complet : cela n'est valable que pour les articles très sales. En ce qui concerne le linge et les vêtements peu sales, un cycle de lavage économique suffit (toute machine propose un mode économique ou un cycle rapide), sachant que les lessives actuelles contiennent des enzymes qui assureront un bon nettoyage même à basse température. Un tel lavage consomme presque 10 fois moins d'électricité qu'un cycle de 30 mn à 90 °C.
- Attendez de pouvoir remplir le lave-linge avant de l'utiliser – il n'est pas économique de ne laver qu'un jean.
- Vérifiez que le linge à laver est réparti uniformément dans le tambour de la machine. Dans le cas contraire, la machine aura des difficultés à faire tourner rapidement le tambour. Si le linge est réparti uniformément, le lave-linge subira moins de pression, le cycle de lavage sera plus court et les pièces de la machine dureront plus longtemps.
- Lorsque vous repassez vos vêtements, triez-les par type de tissu : vous pouvez commencer par les faibles températures, puis passer aux vêtements nécessitant des températures plus élevées, tandis que les petites pièces pourront être mises de côté et repassées à la fin, une fois le fer éteint.
- Certains articles n'ont pas besoin d'être repassés – il suffit de les suspendre soigneusement sur des cintres.

Recyclage et réutilisation

Nous avons pour habitude d'avoir une abondance de choses autour de nous, mais elles ne proviennent pas de nulle part. Tout ce que nous utilisons a été produit en utilisant de l'énergie et avec la contribution de nombreuses personnes. Les déchets issus de cette production et les décharges de plus en plus grandes détériorent nos conditions de vie et ont une incidence négative sur le climat.

- Avant d'acheter quelque chose de neuf, demandez-vous si vous en avez réellement besoin. Vous n'en n'aurez peut-être besoin que quelques temps et pourriez donc aussi bien l'emprunter à quelqu'un d'autre.
- Prenez soin des choses afin qu'elles durent plus longtemps.
- Si vous n'avez plus besoin de quelque chose, demandez-vous si elle pourrait être utile à quelqu'un d'autre. Nous pouvons donnez les jouets et les vêtements que nous n'utilisons plus aux crèches, aux orphelinats ou juste à des enfants de notre entourage. Certains sites Internet permettent de proposer gratuitement des choses que nous n'utilisons plus afin qu'elles trouvent preneur. Les tubes et boîtes d'emballage peuvent être transformés en quelque chose d'autre, les vieux jouets et poupées peuvent être restaurés, et un appareil cassé peut être réparé et fonctionner de nouveau.
- Vous pouvez donner les vieux livres que vous ne lisez plus à la bibliothèque ou procéder à un échange de livres, une pratique devenue populaire ces dernières années : il existe dans certaines bibliothèques et librairies des étagères dédiées où vous pouvez apporter un de vos livres et l'échanger contre un livre précédemment déposé par quelqu'un d'autre.
- Si quelque chose est définitivement cassé, son matériau de fabrication peut être recyclé. Vous pouvez vérifier sur Internet s'il y a, dans votre ville, un point de récupération des objets recyclables – vous aurez peut-être de la chance et disposerez d'un tel point de récupération à proximité de votre domicile. Vous pouvez également afficher des annonces afin d'inciter les habitants de votre quartier à se réunir pour le recyclage des déchets et objets indésirables, ou vous associer à vos amis, ou parler à vos enseignants. Ensemble, vous réunirez peut-être suffisamment de plastique, de papier et de métal pour que le déplacement au centre de recyclage vaille la peine.
- Apportez vos propres sacs lorsque vous faites les courses, de sorte à ne pas avoir besoin d'en acheter des neufs à la caisse (à moins que vous n'en n'ayez réellement besoin). Des sacs en plastique sont désormais gratuitement mis à disposition dans les magasins, lesquels s'avèrent parfois pratiques et nécessaires. Toutefois, vous avez toujours la possibilité d'indiquer au personnel de caisse que vous n'en voulez pas. Un certain nombre de pays commencent à facturer les sacs en plastique, ce qui vaut encore plus la peine d'amener ses propres sacs.
- Il est recommandé d'acheter les produits de consommation courante (lessive, shampoing, certaines céréales, etc.) en gros conditionnement. Rappelez-le à vos parents.

Figure 3.3.3

Déchets métalliques pressés en balles

Tableau 3.3.1 **Comparaison entre du papier produit entièrement à partir de pâte vierge et du papier produit entièrement à partir de matériaux recyclés (par tonne de papier)**

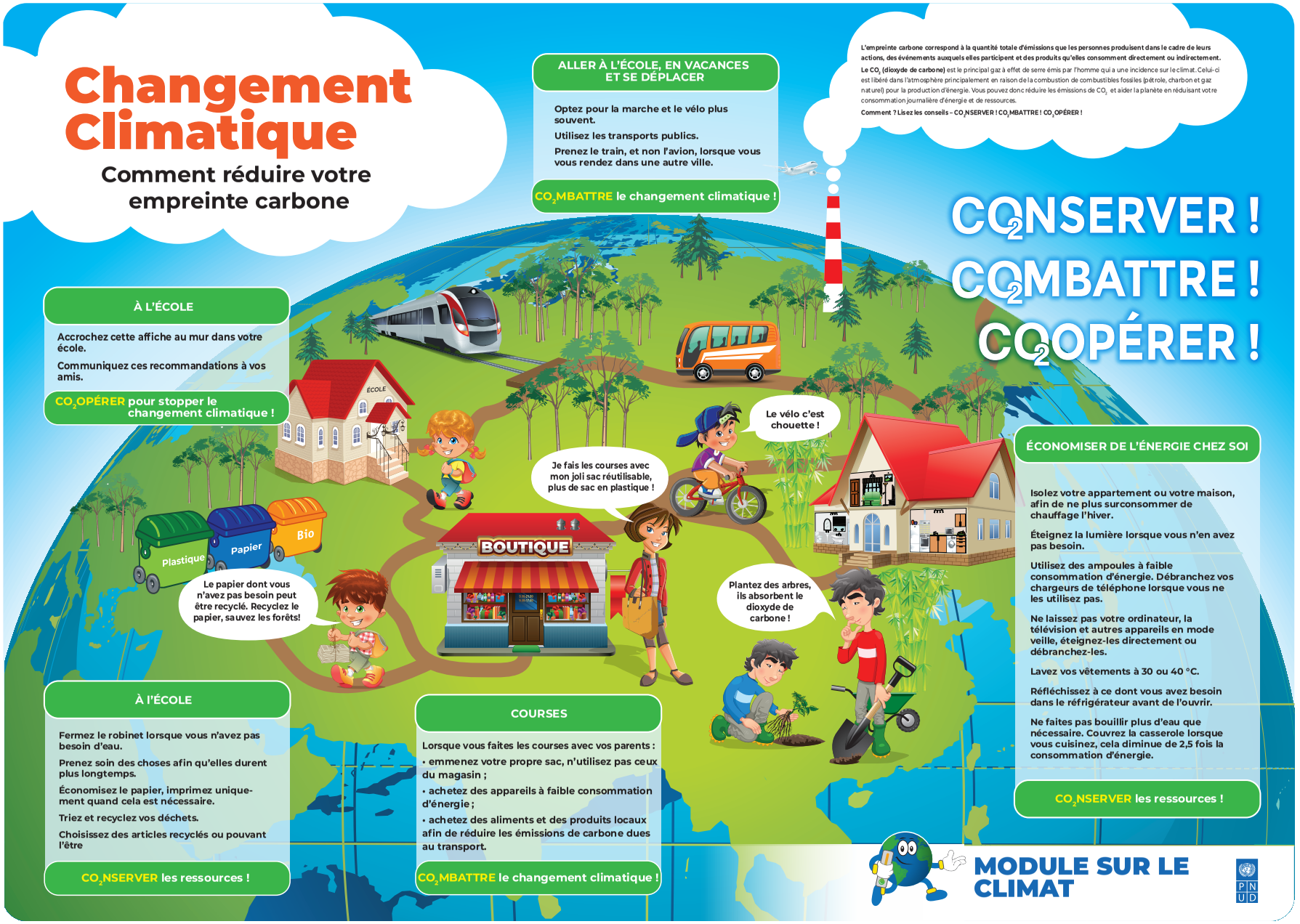
	Papier fabriqué entièrement à partir de pâte vierge	Papier fabriqué entièrement àpartir de matériaux recyclés	Économie
Bois	3 tonnes	0 tonnes	3 tonnes
Énergie	11 140 kilowatts-heure	6 450 kilowatts-heure	4 690 kilowatts-heure
Émissions de gaz àeffet de serre	2 581 kg of CO_2	1 625 kg of CO_2	956 kg of CO_2
Eaux usées	72 000 litres	39 100 litres	33 100 litres
Déchets solides	1 033 kg	506 kg	528 kg

Si nous économisons 1 tonne de papier, nous économiserons également 13 tonnes de pétrole, 4 100 kilowatts-heure d'électricité et 32 tonnes d'eau. La production et l'impression d'une feuille de papier A4 génère 28 g de CO_2, et la copie d'une seule feuille A4 produit 380 g de CO_2.

Économies d'énergie en matière de production grâce à l'utilisation de matériaux recyclés

Aluminium – 95 %
Zinc – 60 à 70 %
Papier – 64 %
Cuivre – 70–85 %
Magnésium – 95 %
Plastique – 80 à 88 %
Plomb – 60 à 80 %
Acier – 70 %
Verre – 68 %

Vous pouvez donc réduire votre empreinte carbone en consommant moins d'énergie et en ne gaspillant pas l'énergie et l'eau, en n'achetant pas de choses inutiles et suremballées, en recyclant vos déchets, en vous déplaçant à pied et en vélo autant que possible, en achetant des produits locaux. Pour finir, n'oubliez pas que nos principaux alliés dans la lutte contre le changement climatique sont les plantes. Prenez soin d'elles et plantez-en de nouvelles chaque fois que vous le pouvez, partout où cela est possible.


Changement Climatique
Comment réduire votre empreinte carbone
L'empreinte carbone correspond à la quantité totale d'émissions que les personnes produisent dans le cadre de leurs actions, des événements auxquels elles participent et des produits qu'elles consomment directement ou indirectement.
Le CO_2 (dioxyde de carbone) est le principal gaz à effet de serre émis par l'homme qui a une incidence sur le climat. Celui-ci est libéré dans l'atmosphère principalement en raison de la combustion de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) pour la production d'énergie. Vous pouvez donc réduire les émissions de CO_2 et aider la planète en réduisant votre consommation journalière d'énergie et de ressources.
Comment ? Lisez les conseils – CO_2NSERVER ! CO_2MBATTRE ! CO_2OPÉRER !
ALLER À L'ÉCOLE, EN VACANCES ET SE DÉPLACER
Optez pour la marche et le vélo plus souvent.
Utilisez les transports publics.
Prenez le train, et non l'avion, lorsque vous vous rendez dans une autre ville.
CO_2MBATTRE le changement climatique !
CO_2NSERVER !
CO_2MBATTRE !
CO_2OPÉRER !
À L'ÉCOLE
Accrochez cette affiche au mur dans votre école.
Communiquez ces recommandations à vos amis.
CO_2OPÉRER pour stopper le changement climatique !
ÉCOLE
Plastique
Papier
Bio
Le papier dont vous n'avez pas besoin peut être recyclé. Recyclez le papier, sauvez les forêts!
Je fais les courses avec mon joli sac réutilisable, plus de sac en plastique !
BOUTIQUE
Le vélo c'est chouette !
Plantez des arbres, ils absorbent le dioxyde de carbone !
ÉCONOMISER DE L'ÉNERGIE CHEZ SOI
Isolez votre appartement ou votre maison, afin de ne plus surconsommer de chauffage l'hiver.
Éteignez la lumière lorsque vous n'en avez pas besoin.
Utilisez des ampoules à faible consommation d'énergie. Débranchez vos chargeurs de téléphone lorsque vous ne les utilisez pas.
Ne laissez pas votre ordinateur, la télévision et autres appareils en mode veille, éteignez-les directement ou débranchez-les.
Lavez vos vêtements à 30 ou 40 °C.
Réfléchissez à ce dont vous avez besoin dans le réfrigérateur avant de l'ouvrir.
Ne faites pas bouillir plus d'eau que nécessaire. Couvrez la casserole lorsque vous cuisinez, cela diminue de 2,5 fois la consommation d'énergie.
CO_2NSERVER les ressources !
À L'ÉCOLE
Fermez le robinet lorsque vous n'avez pas besoin d'eau.
Prenez soin des choses afin qu'elles durent plus longtemps.
Économisez le papier, imprimez uniquement quand cela est nécessaire.
Triez et recyclez vos déchets.
Choisissez des articles recyclés ou pouvant l'être
CO_2NSERVER les ressources !
COURSES
Lorsque vous faites les courses avec vos parents :
• emmenez votre propre sac, n'utilisez pas ceux du magasin ;
• achetez des appareils à faible consommation d'énergie ;
• achetez des aliments et des produits locaux afin de réduire les émissions de carbone dues au transport.
CO_2MBATTRE le changement climatique !
MODULE SUR LE CLIMAT
PNUD

QUESTIONS

1 Qu'est-ce qu'une empreinte carbone ?

2 Quelles unités sont utilisées pour mesurer une empreinte carbone ?

3 Lequel de ces produits a la plus grande empreinte carbone : les fraises cultivées dans le jardin de la ferme locale, ou des fraises importées de l'étranger et joliment emballées ? Pourquoi ?

4 Il fait froid dehors et le chauffage ne fonctionne pas à l'intérieur. Quels sont les conseils les plus utiles pour avoir chaud chez soi et pourquoi ?
a) porter un pull chaud et des chaussettes ;
b) mettre un tapis sous ses pieds ;
c) manger quelque chose ;
d) boire un thé chaud ;
e) allumer un radiateur électrique ;
f) danser, sauter ou courir ;
g) allumer un feu dans le poêle ou la cheminée ;
h) prendre un bain chaud ;
i) s'asseoir au soleil.

5 Quelle est la solution la plus économique et à quel moment : prendre un bain ou prendre une douche ?

6 L'installation de compteurs d'eau peut-elle aider à économiser l'énergie ? Pourquoi ?

7 Consommons-nous de l'énergie lorsque nous utilisons de l'eau dans un immeuble résidentiel ? Quel type d'énergie consommons-nous ?

8 Qu'avez-vous déjà mis à place chez vous pour faire des économies d'énergie ?

9 Quels sont les points importants à se rappeler lors de l'utilisation d'un réfrigérateur ?

EXERCICES

7

Testez votre empreinte carbone

A. Lorsque vous achetez des fruits et légumes dans un magasin, que choisissez-vous habituellement :
- produits locaux non emballés (1 point)
- produits non emballés provenant des régions du sud de votre pays (2 points)
- produits non emballés provenant de France, des Pays-Bas, d'Argentine et d'autres pays (3 points)
- produits importés, préemballés individuellement (4 points)

B. Le sac que vous utilisez pour faire vos courses est :
- en lin ou coton (1 point)
- en papier (2 points)
- un sac plastique que je ramène de chez moi (3 points)
- un sac plastique que je prends ou achète lorsque je paie des marchandises en magasin (4 points)

C. Lorsque vous achetez des boissons, dans quel type de contenant se trouvent-elles habituellement ?
- papier (1 point)
- verre (2 points)
- aluminium (3 points)
- plastique (4 points)

D. Quel livre préférez-vous lire :
- un neuf, acheté en magasin (4 points)
- un électronique (3 points)
- celui qui a déjà été lu (2 points)
- un de la bibliothèque (1 point)

E. Lorsque vous offrez un cadeau à quelqu'un, préférez-vous :
- du papier d'emballage lumineux et attrayant, quel que soit le matériau (4 points)
- papier avec un label environnemental pour montrer qu'il est recyclable (2 points)
- une boîte ou un sac usagé que je décore spécialement (2 points)
- offrir le cadeau sans emballage (1 point)

Réponses

- **De 14 à 16 points :** L'empreinte carbone d'un éléphant ! Mieux vaut consacrer tout son poids aux économies d'énergie.
- **De 11 à 13 points :** L'empreinte carbone d'un sabot de cheval ! Enfilez votre harnais et faites des économies d'énergie.
- **De 8 à 10 points :** Vous avez l'empreinte carbone d'une patte de chat ! Mais ne restez pas assis à ronronner : vous pourriez faire encore mieux.
- **De 5 à 7 points :** Super ! Vous avez l'empreinte carbone d'une souris ! Vous pouvez être fier de vous – il ne vous reste plus qu'à persuader les autres d'être comme vous.

2

Dessinez un tableau composé de quatre colonnes. Dans la première colonne, notez les cas d'utilisation inefficace de l'énergie que vous observez autour de vous (dans la rue, chez vous, à l'école). Dans la deuxième colonne, expliquez comment économiser cette énergie ou l'utiliser plus efficacement dans l'ensemble de ces cas. Dans la troisième colonne, notez les cas d'utilisation efficace de l'énergie que vous avez observés. Enfin, dans la quatrième colonne, donnez pour chaque jour un exemple de situation où vous avez personnellement utilisé l'énergie de manière plus efficace et œuvré pour le bien de la planète. Comparez votre tableau avec celui de vos camarades. Faites le point sur les résultats.

3

Passez toutes vos affaires en revue (de préférence avec vos parents), trouvez l'endroit d'où elles viennent et inscrivez cet endroit sur une carte du monde. Mettez les choses que vous avez achetées ou qui vous ont été données, mais que vous n'utilisez pas, à part. Calculez la distance qu'elles ont parcouru pour arriver jusqu'à vous. Ensuite, composez un diagramme avec ce que vous avez appris, en indiquant la provenance des choses, l'utilité qu'elles ont pour vous (nécessaire, inutile, utile de temps en temps, bonne à recycler, bonne pour en faire autre chose, etc.).

4

Divisez la classe en sept groupes, chaque groupe tire à la courte paille pour choisir un groupe cible : élèves plus jeunes ; élèves plus âgés ; femmes au foyer ; retraités ; industriels ; politiciens ; enseignants. Chaque groupe doit élaborer un projet pour promouvoir les économies d'énergie et l'efficacité énergétique auprès de son groupe cible.

Vos tâches sont les suivantes :

1) réfléchir à un ou plusieurs slogans pour une campagne d'information
2) concevoir une affiche afin d'encourager les économies d'énergie et l'efficacité énergétique au sein de votre groupe
3) élaborer un programme permettant à votre groupe cible de saisir les principes de l'économie d'énergie et de les appliquer.

Incorporez des idées originales dans votre programme, que ce soit un spectacle de marionnettes, la publication d'un livre ou bien la proposition de réformer l'état (en fonction du groupe cible).

Une fois les projets présentés, affichez les meilleures affiches dans l'école.

3.4 Coopération mondiale sur le changement climatique, le développement durable et une approche qui implique l'ensemble de la société dans la lutte contre ses effets

Coopération et négociations mondiales sur le changement climatique

Jusqu'à la fin des années 1970, les seules personnes à se préoccuper du changement climatique étaient les scientifiques.

En 1979, les rapports présentés à l'occasion de la première Conférence mondiale sur le climat ont démontré que l'activité humaine avait un impact considérable sur le climat. Cela a permis d'attirer l'attention des journalistes, puis du grand public, et enfin des gouvernements.

En 1988, les Nations Unies ont reconnu le changement climatique comme l'un des problèmes mondiaux les plus préoccupants de l'humanité.

Certains des meilleurs scientifiques du monde ont commencé à se pencher sur le problème du changement climatique.

En 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé par l'Organisation météorologique internationale et le Programme des Nations Unies pour le développement.

Le Groupe a été chargé d'examiner les preuves scientifiques disponibles et d'indiquer de quelle façon l'activité humaine affectait le climat.

Le premier rapport du GIEC, publié en 1990, a confirmé que le risque de changement climatique était réel et qu'il y avait un lien direct entre l'activité humaine et l'atmosphériques en général. Depuis, cinq autres rapports du GIEC ont été publiés dont le dernier de 2021-2022 qui évaluent le changement climatique en se fondant sur les recherches scientifiques les plus récentes menées par des spécialistes du monde entier.

Depuis le premier rapport du GIEC, la plupart des scientifiques s'accordent de plus en plus sur le caractère anthropique du changement climatique et sur le fait que nous pouvons et devons trouver des moyens de le combattre. Cela ne sera possible que si les pays du monde entier travaillent ensemble, et le meilleur moyen d'y parvenir est de le faire sous les auspices des Nations Unies.

En 1992, lors d'une conférence des Nations Unies consacrée à l'environnement et au développement, tenue à Rio de Janeiro, au Brésil, les pays du monde entier ont convenu de la nécessité de coopérer sur les questions liées au climat, à la biodiversité, aux forêts et à la désertification. L'accord sur les questions climatiques s'est traduit par un traité international, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), qui a été négociée dans un délai record de 18 mois.

La Convention sur les changements climatiques s'est contentée d'énoncer certaines mesures générales visant à limiter et réduire les émissions de gaz à effet de serre, et à coopérer en matière d'adaptation aux impacts climatiques. Par conséquent, en 1995, lors de la première Conférence des Parties à la Convention (c.-à-d. les pays signataires de la Convention), décision a été prise de préparer un autre document international visant à réglementer les mesures concrètes adoptées par les Parties en vue du XXIe siècle.

Les négociations associées à l'élaboration de ce document ont été particulièrement complexes et difficiles. Toutefois, les pays sont parvenus à un accord. Et en décembre 1997, au Japon, ils ont adopté un nouveau traité international appelé le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) du nom de la ville où celui-ci a été signé.

Le Protocole de Kyoto était révolutionnaire en ce sens qu'il contenait les engagements des différents pays développés à ne pas dépasser un certain seuil d'émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 par rapport à 1990, prise comme année de référence. Il a également introduit des mécanismes de marché innovants qui fixent un prix aux émissions de dioxyde de carbone.

Nations Unies
Convention-cadre sur les changements climatiques

À titre d'exemple, l'Union européenne s'est engagée à réduire ses émissions de 8 %, le Japon de 6 %, quant à la Russie et l'Ukraine, elles se sont engagées à ne pas dépasser le volume de leurs émissions en 1990.

Les États-Unis, responsables du plus gros volume d'émissions de gaz à effet de serre au monde, ont activement participé aux négociations relatives au Protocole de Kyoto, mais ne l'ont finalement pas ratifié en 2001.

Fin 2012, deux traités internationaux étaient donc en vigueur : la Convention sur les changements climatiques, document international définissant la stratégie générale à adopter par l'humanité pour lutter contre le changement climatique, et le Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies, qui regroupe les engagements précis souscrits par les pays industrialisés, comme l'Union européenne, et les pays en transition, comme la Russie et l'Ukraine.

La période des engagements souscrits par les pays industrialisés et les pays en transition dans le cadre du Protocole de Kyoto a expiré fin 2012, et une nouvelle série de négociations a été entamée pour la période suivante, commençant en 2013. En 2013, les pays développés qui font toujours partie du protocole de Tokyo se sont de nouveau engagés à réduire les émissions de gaz à effet de serre durant la période de 2013 à 2020, en promettant des réductions plus substantielles que les précédentes.

Cependant, l'attitude d'un certain nombre de pays à l'égard du Protocole de Kyoto a changé. Les États-Unis, le Canada, le Japon, la Nouvelle-Zélande et la Russie n'ont pas adhéré à l'accord pour la période 2013-2020. Selon eux, le monde est en pleine mutation depuis les années 1990 et, à l'heure actuelle, la quasi-totalité de la croissance des émissions provient des grands pays en développement (la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Afrique du Sud et autres), dont les émissions ne sont pas réglementées par le Protocole de Kyoto.

La solution trouvée à l'époque était que les pays développés qui ne font pas partie de la deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto prennent des engagements volontaires de réduction des émissions d'ici 2020 et que les pays en développement mettent en œuvre des mesures nationales appropriées. Mesures d'atténuation dont ils définissent eux-mêmes la forme et la portée.

Figure 3.4.2

Adoption de l'Accord de Paris historique lors de la COP21 à Paris en 2015

Jalons dans la lutte contre le changement climatique

- 1992 - Convention sur les changements climatiques, lorsque les pays ont convenu de définir des objectifs d'actions afin de revenir aux niveaux d'émissions de 1990 ;
- 2008-2012 - la première période d'engagement du Protocole de Kyoto – 37 pays développés ainsi que la Communauté européenne se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 ;
- 2013-2020 - la seconde période d'engagement du Protocole de Kyoto – les pays développés se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'au moins 18 % par rapport au niveau de 1990 ;
- Cependant, les pays développés qui n'ont pas participé à la deuxième période d'engagement ont pris des engagements volontaires pour réduire leurs émissions d'ici 2020, et les pays en développement ont accepté de mettre en œuvre des mesures d'atténuation appropriées au niveau national (NAMA) ;
- 2015 – Adoption de l'Accord de Paris qui comprend les contributions déterminées au niveau national (CDN) par les différents pays ainsi que des mesures ambitieuses à long terme pour parvenir à réduire les émissions de gaz à effet de serre ;
- 2016 – Entrée en vigueur de l'Accord de Paris avec les premiers engagements de réduction des émissions (CDN) entre 2020 et 2025, ou 2020 et 2030.

En décembre 2015, plusieurs pays se sont rencontrés à Paris lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques afin d'adopter un nouvel accord universel sur le climat, lequel sera mis en œuvre en 2020 et s'appliquera à toutes les nations du monde. Avant de se réunir à Paris, les gouvernements ont présenté leurs engagements par rapport au changement climatique, appelés **« contributions déterminées au niveau national »** (CDN), et y ont exposé leurs objectifs nationaux de réduction des émissions à moyen et long terme. L'objectif est de limiter la hausse de la température moyenne mondiale bien en-dessous de 2 °C et aux alentours de 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels.

La conférence de Paris s'est penchée sur un vaste éventail de défis et de solutions liés au changement climatique, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation aux conséquences du changement climatique, les pertes et les dommages dus au changement climatique ainsi que le soutien technologique, le développement des capacités et le soutien financier pour de telles actions. L'Accord de Paris fournit un cadre juridique aux actions relatives au changement climatique menées à partir de 2020 ; tandis que des décisions plus détaillées sur sa mise en œuvre ont été formulées et convenues lors de conférences ultérieures sur le climat.

Une coopération internationale effective pourrait permettre au monde de se tenir à l'objectif 2 °C et aux alentours de 1.5 °C et de s'adapter à aux changements climatiques en cours. Elle pourrait également permettre aux différents pays de saisir les nombreuses opportunités et les avantages associés à la transition vers des économies à faible émission de carbone et résilientes au changement climatique.

Il est important de noter que l'Accord de Paris n'impose pas de limitation ou d'objectifs de réduction des émissions aux pays. Au contraire, cela encourage les pays eux-mêmes à fixer des objectifs qui représentent leurs meilleurs efforts possibles pour contribuer aux objectifs de température de l'Accord de Paris. Ces efforts se reflètent dans les plans climatiques nationaux qui sont soumis périodiquement par les pays en tant que CDN. La première série de CDN a été soumise en 2015-2016 et la seconde en 2021-2022.

Pour garantir que les CDN promises par les pays ramènent collectivement les émissions bien en dessous de 2 °C et vers 1,5 °C, un nouveau mécanisme a été introduit dans l'Accord de Paris, connu sous le nom de Bilan mondial (GST). Le GST évaluera les progrès collectifs vers les objectifs de l'Accord de Paris, en tenant compte des meilleures connaissances scientifiques disponibles et de l'équité. Cela contribuera à encourager et à informer les pays à accroître leur ambition et à intensifier leurs actions conformément aux exigences scientifiques lorsqu'ils mettront à jour leurs CDN. Les prochaines CDN attendues en 2025 devraient inclure des objectifs pour 2035.

Le premier GST a eu lieu en 2022-2023 et a culminé lors de la Conférence des Parties (COP28) tenue en décembre 2023 à Dubaï, aux Émirats arabes unis. Les pays sont parvenus à un consensus sur le fait que le monde n'est pas sur la bonne voie pour atteindre l'objectif de 1,5 °C de l'Accord de Paris et qu'il doit prendre des mesures urgentes et ambitieuses en matière d'atténuation et d'adaptation et les refléter dans les prochaines CDN en 2025.

Le bilan mondial reconnaît les données scientifiques qui indiquent que les émissions mondiales de gaz à effet de serre doivent être réduites de 43 % d'ici 2030 et de 60 % en 2035 par rapport aux niveaux de 2019, pour atteindre zéro émission nette d'ici 2050 et limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C.

Le bilan demande aux pays de a) prendre des mesures concrètes pour tripler la capacité d'énergie renouvelable et doubler les améliorations de l'efficacité énergétique d'ici 2030 à l'échelle mondiale et réduire les émissions de méthane ; et b) accélérer les efforts visant à réduire progressivement l'énergie alimentée au charbon, à éliminer progressivement les subventions inefficaces aux combustibles fossiles et à abandonner les combustibles fossiles dans les systèmes énergétiques d'une manière juste, ordonnée et équitable. Il appelle les pays développés à continuer de diriger la transition vers un avenir résilient et neutre en émissions.

La COP28 est également parvenue à un consensus sur le renforcement du soutien aux pays en développement pour permettre une action aussi ambitieuse. Par exemple, l'évaluation du GST a conduit à la mise en place de mécanismes et d'outils de financement pour aider à faire face à des événements tels que les inondations extrêmes à Sylhet, au Bangladesh en 2022, qui ont entraîné une pénurie d'eau potable (Fig. 3.4.2). Le résultat du GST donne ainsi aux pays une chance équitable d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris au cours de cette décennie critique pour l'action climatique.

Figure 3.4.2

Des femmes cherchent de l'eau potable à Sylhet, au Bangladesh, après des inondations extrêmes en 2022

L'Accord de Paris exige également que les pays développés soutiennent les pays en développement en leur renforçant leurs capacités financières et technologiques. Dans le cadre du GST, les pays ont reconnu la nécessité de fournir aux pays en développement un financement climatique de l'ordre de 5 800 à 5 900 milliards de dollars pour la période pré-2030.

La COP28 a également été la première à mettre en lumière l'impact du changement climatique sur la santé humaine. Les ministres de la santé, de l'environnement, des finances et d'autres secteurs connexes ont défini une feuille de route et des opportunités d'actions pour résoudre ce problème. Les pays ont adopté la première Déclaration sur la santé et le changement climatique, dans laquelle ils se sont engagés à unir leurs forces et à œuvrer pour transformer les systèmes de santé afin qu'ils soient résilients au climat, à faibles émissions de carbone, durables et équitables, et à mieux préparer les communautés et les populations les plus vulnérables aux impacts du changement climatique.

Changement climatique et développement durable

La coopération internationale sur le changement climatique est étroitement liée à l'autre préoccupation majeure de l'humanité : comment parvenir à un développement durable pour la prospérité mondiale. Le développement durable nécessite des actions qui se soutiennent mutuellement dans trois domaines : économique, social et environnemental. Et le changement climatique les impacte tous les trois.

Lors de l'Assemblée générale des Nations Unies en septembre 2015, 193 pays ont adopté le Programme de développement durable à l'horizon 2030 et **17 Objectifs de développement durable** (ODD). L'Objectif 13 vise à « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » (Fig. 3.4.3).

Figure 3.4.3 **Les 17 Objectifs de développement durable des Nations Unies**

De nombreux autres objectifs se rapportent également au changement climatique, par exemple l'Objectif 7 : « Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes, et à un coût abordable ».

Dans un monde moderne axé sur les évolutions technologiques, environ 1,3 milliard de personnes, dont 80 % en zones rurales, n'ont pas accès à l'électricité. Ces populations, les plus pauvres du monde, représentent plus de 16 % des 8 milliards de personnes vivant sur la planète.

Davantage de personnes encore, environ 3 milliards, dépendent de la biomasse (bois et bois de chauffage) pour la préparation des aliments et le chauffage. Selon l'Organisation mondiale de la santé, les polluants émis dans l'atmosphère du fait de la combustion de biomasse dans des appareils de cuisson inefficaces, peut entraîner le décès prématuré de 1,5 million de personnes chaque année, soit plus de 4 000 par jour. Cela est bien plus que le nombre de personnes décédant chaque jour de la malaria, de la tuberculose et du SIDA. Ces personnes extrêmement pauvres vivent en Afrique, dans le sud du désert du Sahara (le plus grand désert du monde), ainsi qu'en Asie du Sud et en Amérique latine.

Ce problème est ce que l'on appelle la **« pauvreté énergétique »**.

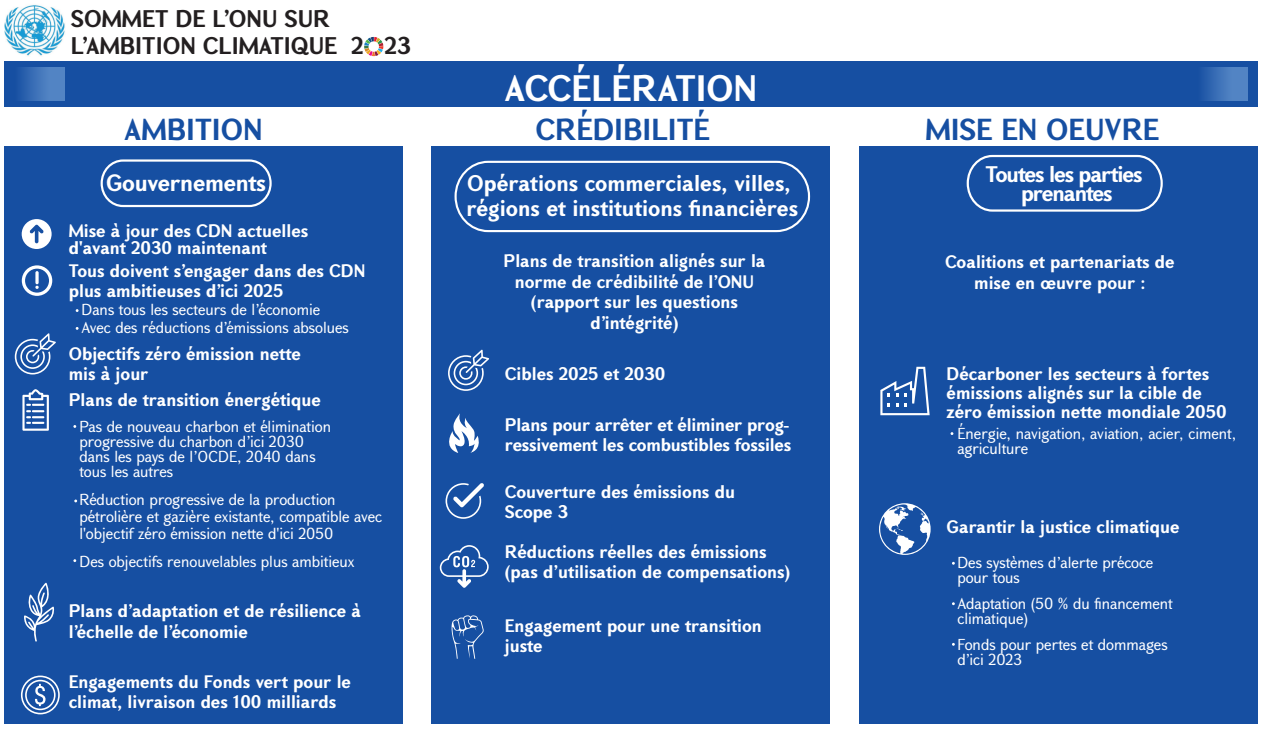
La réalisation des objectifs en matière de changement climatique et l'objectif de fournir à tous l'accès à l'électricité se renforcent mutuellement. Une énergie propre, efficace, abordable et fiable est essentielle à la santé et à la prospérité mondiales, et l'utilisation efficace des ressources énergétiques permet de lutter contre le changement climatique. C'est pourquoi il est vital de promouvoir l'utilisation rationnelle et efficace des ressources énergétiques..

Approche pansociétale du changement climatique

Depuis les années 1990, les représentants des entreprises, des villes, des régions, des investisseurs, de la société civile, du monde universitaire et des organisations de femmes, de jeunes et de peuples autochtones, ou encore des acteurs non gouvernementaux, sont de plus en plus engagés dans les négociations sur le changement climatique.

C'est lors de la COP21 à Paris que les gouvernements ont formellement convenu qu'il était urgent de mobiliser une action climatique plus forte et plus ambitieuse pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Tout le monde a un rôle à jouer. La société et d'autres acteurs non gouvernementaux s'engagent dans l'action climatique en créant leurs propres plans climatiques, en fixant des objectifs de réduction des émissions, en divulguant les risques climatiques, en améliorant les compétences et les capacités techniques et en aidant à l'exécution locale des objectifs politiques nationaux. Ils travaillent également ensemble, et souvent avec les gouvernements nationaux, dans le cadre d'initiatives climatiques transnationales ou d'initiatives de coopération internationale. Le Sommet Ambition Climat des Nations Unies de 2023 a accordé une attention particulière au rôle des gouvernements, des entreprises, des villes, des régions et des institutions financières, ainsi qu'à la manière dont ils peuvent travailler ensemble pour faire de la décarbonation de la société et de l'économie une réalité (Fig. 3.4.4).

Figure 3.4.4 Comment plusieurs parties prenantes collaborent pour lutter contre le changement climatique : Sommet de l'ONU sur l'ambition climatique



La CCNUCC fournit des informations sur plus de 32 000 initiatives et acteurs engagés dans l'action climatique. En octobre 2023, il s'agissait de 15 590 entreprises, 1 654 investisseurs, 3 443 organisations, 282 régions, 11 354 villes et 194 pays. Des champions de haut niveau à la CCNUCC guident les actions des acteurs non gouvernementaux pour permettre la collaboration entre les gouvernements et les villes, les régions, les entreprises et les investisseurs qui doivent agir contre le changement climatique. Les initiatives récentes les plus notables sont les Percées 2030 (2030 Breakthrough), le programme d'adaptation de Charm el-Cheikh, les campagnes Race to Zero et Race to Resilience.

Reconnaissant l'importance d'impliquer les jeunes dans l'action climatique, la COP28 à Dubaï a créé le poste de Youth Climate Champion. Le champion est chargé d'améliorer la participation et la représentation significatives des jeunes dans les futures COP.

EXERCICES

1

Dans cette série d'exercices, vous pouvez vous essayer au rôle de négociateur international. Lisez les 10 conseils et apprenez-les par cœur.

10 conseils destinés au négociateur international

1. Concentrez-vous sur le sujet dont il est question. Ne vous en écartez pas. Ne suivez pas d'autres pistes ou n'abordez pas d'autres sujets.

2. Essayez de déterminer et distinguer l'idée principale, et concentrez-vous sur le contenu et non la forme. Cependant, lorsque vous dialoguez avec les autres, n'oubliez pas qu'en diplomatie, la forme ou la manière dont vous présentez vos idées compte beaucoup.

3. Paraphrasez ce qu'a dit votre interlocuteur et vérifiez que vous avez bien compris ses propos (« Sauf erreur de ma part, vous voulez dire que… », « Si j'ai bien compris… »).

4. Posez des questions.

5. Respectez le silence de votre interlocuteur, ne cherchez pas à combler les blancs dans la conversation.

6. Interprétez les informations du point de vue de votre propre culture, mais également du point de vue de la culture étrangère de votre homologue.

7. Essayez de ne pas faire vos propres interprétations du comportement de quelqu'un d'autre.

8. Ne vous hâtez pas d'émettre des évaluations et jugements de valeur.

9. Apprenez à reconnaître les messages non verbaux de votre interlocuteur (expressions du visage, gestes, position, intonation, etc.).

10. Ne tirez pas de conclusions prématurées sur la base d'un seul geste ou signe.

Il est intéressant de noter que les stratégies de négociation les plus performantes avec les personnes issues d'autres cultures consistent simplement à imiter ces personnes. Le fait de copier la manière dont votre interlocuteur se comporte augmente considérablement vos chances de parvenir à une issue positive pour les deux parties. Être un caméléon peut vous aider à réussir vos négociations internationales. Dans tous les cas, la courtoisie, le respect de votre interlocuteur et de sa culture, et une communication ouverte avec celui-ci peuvent faire des merveilles. Il en va de même dans la vie de tous les jours.

2

Jeu

Imaginez que vous participez à la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques et que vous êtes sur le point de discuter des problèmes rencontrés par les différents pays en relation avec le changement climatique.

Préparez un rapide discours de bienvenue que votre chef d'État lira à l'ensemble des participants à la Conférence. Le discours doit mentionner :

– le climat et les principales ressources naturelles de votre pays ;

– les conditions de vie des habitants de votre pays ;

– les secteurs les plus importants pour l'économie de votre pays ;

– l'impact du changement climatique sur la nature, les populations et l'économie ;

– ce que votre pays attend de la Conférence.

Une fois le discours de bienvenue effectué, les participants à la Conférence expriment leurs opinions sur la façon de prévenir les effets néfastes du changement climatique sur l'environnement et les populations dans les pays prenant part à la Conférence.

À la fin du jeu, les participants sélectionnent un gagnant, à savoir l'élève ayant le plus contribué au débat, et dont les propos étaient les plus pertinents, les mieux argumentés et les plus intéressants.

3

Vous êtes fonctionnaire du gouvernement d'un petit État insulaire de la région Pacifique. Actuellement, vous préparez une proposition pour demander un appui financier international afin d'aider votre pays à faire face aux effets négatifs du changement climatique. Reprenez les points suivants dans votre proposition :

1) Quels effets prévisibles du réchauffement planétaire représentent la plus grande menace pour votre pays ?

2) Quelles seront les mesures à prendre si la montée du niveau de l'océan submerge l'ensemble de votre île ?

3) À quels organismes internationaux et États demanderez-vous de l'aide ?

4) Comment envisagez-vous de préserver la culture de votre pays, si votre île venait à être engloutie par la mer ?

4

Directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils du Module sur le Climat dans les établissements scolaires

4 Directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils du Module sur le Climat dans les établissements scolaires

Le Module sur le Climat est un ensemble interactif de matériel pédagogique et de jeux sur le changement climatique qui s'adresse aux enseignants de sciences naturelles, d'études sociales et d'environnement de la 1re à la 11e année.

Les supports ont été préparés par le PNUD, avec l'appui du Fonds pour l'environnement mondial, du ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles russe, et de la société Coca-Cola. Le Module sur le Climat poursuit la série des trousses à outils destinées aux élèves préalablement élaborées et présentées par le PNUD et ses partenaires, et qui succède au Module sur la Mer Noire et au Petit Coffre au Trésor du Baïkal.

Les objectifs du Module sur le Climat :

- informer les élèves sur le monde qui les entoure et sur les relations entre l'homme et l'environnement ;
- promouvoir les notions de protection et de respect de la nature ;
- inculquer une culture environnementale de consommation responsable à la nouvelle génération, afin de développer chez les plus jeunes des compétences en matière d'économies d'énergie et de préservation des ressources ;
- aider les enseignants à préparer et dispenser des enseignements sur des thèmes directement ou indirectement liés au changement climatique.

La trousse à outils interactive contient les éléments suivants :

Un manuel illustré pour les étudiants avec du matériel pédagogique et une variété de questions et d'exercices pour les individus et les groupes, ainsi que des lignes directrices pour les enseignants sur l'utilisation de la boîte à outils dans les cours pour les étudiants de différents groupes d'âge (en tant que chapitre du manuel et supplément autonome)

Le Quiz Climat, un jeu de cartes

Une carte murale illustrant les effets possibles du changement climatique sur la nature et l'humanité dans diverses régions du monde d'ici la fin du XXIe siècle

Une affiche avec des conseils pour réduire votre empreinte carbone

Une affiche contenant des recommandations sur la manière de résister et de s'adapter aux impacts du changement climatique difficiles à atténuer

climate-box.com – un site Web avec tous les documents de la boîte à outils.

Manuel scolaire du Module sur le Climat

Le manuel se décline en trois sections : « Le problème du changement climatique » ; « Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ? » ; et « Comment éviter les changements climatiques dangereux ? ».

Le manuel aide les élèves à distinguer les différents types de climat et de zones naturelles ; explique la relation entre les différents composants géographiques des systèmes naturels ; enseigne comment comprendre les éléments essentiels des caractéristiques géographiques et des phénomènes météorologiques et comment ceux-ci peuvent évoluer à la suite de tout impact d'origine naturelle ou humaine ; explique en quoi consiste l'utilisation des sources d'énergie alternatives ; enseigne les règles de conduite à adopter en cas de conditions météorologiques extrêmes ; et leur explique comment utiliser les ressources de manière économe, chez soi, à l'école et à l'extérieur. Les informations contenues dans chaque section du manuel peuvent compléter utilement de nombreux aspects des programmes éducatifs.

Le manuel contient des faits intéressants et instructifs concernant les anomalies d'origine naturelle, des exemples des conséquences que peuvent avoir les effets du changement climatique sur les régions côtières, montagneuses et arctiques, les forêts, villes et pays. Il donne aux étudiants la possibilité d'analyser les informations de manière indépendante et de construire des hypothèses et des prévisions sur les processus et phénomènes naturels pertinents pour la région où ils vivent.

Le manuel aide les étudiants à voir le monde du point de vue d'un astronome, d'un géographe ou d'un écologiste. Le manuel aide les élèves à voir le monde du point de vue d'un astronome, d'un géographe et d'un écologiste. Des illustrations attrayantes et colorées, des tableaux et des graphiques aident à renforcer la compréhension de l'évolution (par référence aux événements passés liés aux changements climatiques et à l'aspect de notre planète aujourd'hui), des différences territoriales au niveau des processus de formation du climat, des caractéristiques géographiques des complexes naturels des différents continents et océans, des pratiques de conservation, des causes naturelles et humaines à l'origine des problèmes environnementaux, des mesures visant à préserver le milieu naturel et à protéger les populations des catastrophes naturelles et provoquées par l'homme, et de l'empreinte carbone des êtres humains sur Terre.

Les questions et les exercices permettent aux étudiants de mettre toutes ces connaissances en pratique. Le manuel peut être utilisé pour travailler avec les élèves dès l'âge de 8 ans, mais est particulièrement adapté aux élèves âgés de 10 à 13 ans, tant dans le cadre du programme principal que dans le cadre des activités extra-scolaires.

Il est recommandé aux enseignants d'utiliser le manuel et les supports connexes en tenant compte de ce sur quoi leurs élèves travaillent actuellement, de leurs besoins, leurs intérêts et leurs capacités. Certains enfants trouveront l'ensemble du manuel intéressant, tandis que d'autres ne seront intéressés que par des faits et des illustrations spécifiques ou des idées d'expériences.

Les tableaux ci-dessous indiquent comment lier le Module sur le climat aux programmes nationaux. Bien que centrées sur le programme éducatif russe, ces suggestions pourraient s'appliquer à des programmes similaires dans d'autres pays.

Nous sommes convaincus que chaque élève trouvera quelque chose de nouveau et d'intéressant dans le manuel. Nous recommandons aux enseignants d'adopter une approche créative lors de l'utilisation de la trousse à outils, en faisant usage du matériel dans le cadre d'activités parascolaires et extrascolaires : il peut s'agir d'activités en extérieur, d'actions environnementales, de semaines thématiques, de concours et de quizz, et de cercles d'études. L'équipe des auteurs espère sincèrement que la trousse à outils du Module sur le Climat encouragera les élèves, les enseignants et les parents à modifier leur style de vie en vue d'une meilleure conscience environnementale.

Educational programmes

Programmes éducatifs

Programme national pour l'enseignement primaire. « Le monde qui nous entoure » (Pour les niveaux 1 à 4).

Enseignement secondaire

Programmes nationaux pour l'enseignement secondaire de base dans les matières :

- Géographie (pour les niveaux 5-11)
- Biologie (pour les niveaux 5-11)
- Chimie (pour les niveaux 8-11)
- Physique (pour les niveaux 7-11)
- Études sociales (de la 6e à la 11e année)
- Fondements sécuritaires (pour les niveaux 8-11)

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel du Module sur le Climat	Le monde qui nous entoure Contenu programmatique et thématique			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
PARTIE 1. Le problème du changement climatique				
1.1. Le climat et temps	• Suivi de la météo dans votre région. Météo et thermomètre. Détermination de la température de l'air (de l'eau) à l'aide d'un thermomètre. Observation des changements saisonniers de la nature.	• Comment la Terre diffère des autres planètes ? Conditions de vie sur le Terre.	• Propriétés de l'air. L'importance de l'air pour les plantes, les animaux et les êtres humains.	• Le Soleil est l'étoile la plus proche de nous, une source de lumière et de chaleur pour toute la vie sur Terre. • La rotation de La Terre autour du Soleil et le changement de saisons.
1.2 Les types de climat et les zones climatiques	–	–	–	• Zones climatiques de votre pays : idée générale, principales zones climatiques (climat, faune et flore, particularités du travail et de la vie de la population, influence humaine sur la nature des zones étudiées, conservation de la nature). Connexions dans les zones climatiques.
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé ?	–	–	–	• Méthodes pour comprendre la nature : observations, comparaisons, mesures, expériences visant à étudier les objets naturels et les phénomènes.
1.4. Le changement climatique de nos jours	–	–	–	• Enjeux écologiques des interactions entre les êtres humains et la nature.

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel du Module sur le Climat	Le monde qui nous entoure Contenu programmatique et thématique			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?				
2.1. Les effets du changement climatique sur le temps	–	–	–	–
2.2. Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux	• Plantes. Les plantes dans l'environnement immédiat. Plantes à feuilles caduques et plantes conifères. Plantes sauvages et cultivées. Plantes d'intérieur, règles d'entretien et soins. • Animaux. Animaux domestiques et sauvages (différences des conditions de vie). • Nature inanimée et vivante. Relations entre les êtres humains et la nature. Règles d'éthique et de comportement sans danger dans la nature.	• Diversité des plantes (flore). • Diversité des animaux (faune). • Connexions dans la nature. Le déroulement annuel des changements dans la vie de plantes et des animaux • La Liste Rouge, sa signification, représentants individuels des plantes et des animaux de la Liste rouge. • Réserves naturelles parcs. Protection de la nature. Règles d'éthique, comportement dans la nature.	• Dépendance du cycle de vie des organismes aux conditions environnementales. • Conditions nécessaires pour la vie végétale (lumière, chaleur, air, eau). • Conditions nécessaires pour la vie animale (air, eau, chaleur, nourriture). • Plantes et animaux de notre région. • Influence humaine sur les communautés naturelles.	• Protection des ressources naturelles : eau, air, minéraux, flore et faune. Liste rouge internationale (exemples sélectionnés).
2.3. Les effets du changement climatique sur les forêts	• Plantes. Plantes dans leur environnement immédiat. Plantes à feuilles caduques et plantes conifères. Plantes sauvages et cultivées. Plantes d'intérieur, règles d'entretien et de soins. • Animaux. Animaux domestiques et sauvages (différences des conditions de vie). • Nature inanimée et vivante. Relations entre les êtres humains et la nature. Règles d'éthique et de comportements sans danger dans la nature.	• Diversité des plantes (flore). • Diversité des animaux (faune). • Connexions dans la nature. Le déroulement annuel des changements dans la vie des plantes et des animaux • La Liste Rouge, sa signification, représentants individuels des plantes et des animaux de la Liste rouge. Réserves, parcs naturels. Protection de nature. Règles d'éthique et de comportements sans danger dans la nature	• Diversité des plantes (flore). • Diversité des animaux (faune). • Connexions dans la nature. Le déroulement annuel des changements dans la vie des plantes et des animaux • La Liste Rouge, sa signification, représentants individuels des plantes et des animaux de la Liste rouge. Réserves, parcs naturels. Protection de nature. Règles d'éthique et de comportements sans danger dans la nature	Protection des ressources naturelles : eau, air, minéraux, flore et faune. Liste rouge internationale (exemples sélectionnés).

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE				
Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	**Le monde qui nous entoure Contenu programmatique et thématique**			
	Niveau 1	**Niveau 2**	**Niveau 3**	**Niveau 4**
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?				
2.4. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau	• Plantes. Plantes dans l'environnement immédiat. Plantes à feuilles caduques et plantes conifères. Plantes sauvages et cultivées. Plantes d'intérieur, règles d'entretien et de soins. • Animaux. Animaux domestiques et sauvages (différences des conditions de vie). • Nature inanimée et vivante. Relations entre les êtres humains et la nature. Règles d'éthique et de comportements sans danger dans la nature.	–	• Eau. Distribution de l'eau dans la nature, importance pour les organismes vivants et la vie humaine. Le cycle de l'eau dans la nature. Protection de l'eau.	• Les réservoirs, leur diversité (océan, mer, lac, étang, marais) ; rivière comme un courant d'eau ; utilisation humaine des rivières et réservoirs. Réservoirs et rivières de notre région (noms, brève description basée sur des observations).
2.5. Les effets du changement climatique sur l'agriculture	–	–	• Le sol, sa composition, son importance pour la faune et la vie économique humaine.	–
2.6. Les effets du changement climatique sur les régions côtières	–	• Continents et océans.	–	–
2.7. Les effets du changement climatique sur les régions montagneuses	–	–	–	–
2.8. Les effets du changement climatique sur la région arctique	–	–	–	–
2.9. Les effets du changement climatique sur les villes et la santé	–	–	–	–
2.10. Les effets du changement climatique sur les problèmes sociaux	–	–	• Pays et nations du monde.	–

Enseignement primaire

Section dans le manuel du Module sur le Climat	Le monde qui nous entoure Contenu programmatique et thématique			
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
PARTIE 3. Comment prévenir les changements climatiques dangereux ?				
3.1. Les énergies « vertes » **3.1.1. Qu'est-ce que l'énergie** **3.1.2. Les principales sources d'énergie**	–	–	–	–
3.1.3. Les combustibles fossiles	–	–	• Roches et minéraux. Leur importance dans les activités économiques humaines et l'utilisation durable des minéraux. Minéraux de notre région (2-3 exemples)	–
3.1.4. L'énergie nucléaire	–	–	–	–
3.1.5. Les énergies renouvelables	–	–	–	–
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	–	–	–	–
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie **3.2.1. Transports respectueux de l'environnement** **3.2.2. Appareils électro-ménagers et appareils**	–	–	–	–
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs **3.2.4. Les villes vertes**	–	–	–	–
3.3. L'empreinte carbone Comment puis-je aider la planète en réduisant mon empreinte carbone	• Attitude pondérée vis-à-vis des choses, en prendre bien soin.	–	–	• Règles de comportement éthique dans la nature.
3.4. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable	–	–	–	• Règles de comportement éthique dans la société, attitude envers les personnes indépendamment de leur nationalité, statut social, croyances religieuses.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 1. Le problème du changement climatique						
1.1. Climat et temps	• Méthodes géographiques d'étude des objets et des phénomènes. • Observations phénologiques dans la nature	• Température de l'air. Température moyenne quotidienne, moyenne mensuelle, moyenne annuelle. Variation annuelle de la température de l'air. • Eau dans l'atmosphère. Types de précipitations. • Météo et ses indicateurs. Causes des changements météorologiques. • Climat et facteurs déterminant la climat • Dépendance du climat sur la situation géographique et l'altitude de la zone au-dessus niveau de la mer. • Adaptation humaine aux conditions climatiques. • Météorologue comme profession. • Données météorologiques de base. • Phénomènes naturels dans l'atmosphère.	–	• Facteurs déterminant le climat dans notre pays. • L'influence de la situation géographique sur le climat d'un pays.	–	–
1.2 Les types de climat et les zones climatiques	–	• Complexes naturels mondiaux, régionaux et locaux. Complexes naturels de la zone locale	• Diversité du climat sur Terre. Facteurs déterminant la climat. • Caractéristiques des zones climatiques principales et de transition de la Terre.	• Zones climatiques et types de climats de notre pays, leurs caractéristiques.	–	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 1. Le problème du changement climatique						
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé	La Terre dans le système solaire. • Le mouvement du La Terre autour du Soleil. • Changement de saisons sur la Terre. Répartition inégale du soleil et de la chaleur sur la surface de la terre. • Tropiques et cercles polaires. • La rotation de la Terre autour de son axe.	–	–	• Glaciations anciennes et modernes.	–	–
1.4. Le changement climatique de nos jours	–	• Moyens d'étudier et de surveiller le climat mondial. • La climatologie en tant que profession. • Méthodes à distance dans l'étude de l'influence humaine sur l'atmosphère terrestre.	• L'influence des activités économiques humaines modernes sur le climat de la Terre. • Le changement climatique mondial et différents points de vue sur ses causes.	• Glaciations anciennes et modernes. • Changement climatique causé par des facteurs naturels et anthropiques. • Les changements climatiques observés sur le territoire de notre pays et leurs conséquences. Moyens d'adaptation au changement climatique. • Caractéristiques du climat de notre région. • Impacts prévus du changement climatique sur différents systèmes naturels et économiques de notre pays.	–	• Orientations modernes de la recherche géographique. • Adaptation humaine à diverses conditions naturelles et à leurs changements au fil du temps.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le monde naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique						
2.1. Quels sont les effets du changement climatique sur le temps	–	• Phénomènes naturels dans l'atmosphère, méthodes d'observation et de protection.	–	• Phénomènes météorologiques dangereux et défavorables.	–	• Risques naturels, changement climatique.
2.2. Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux	–	• Biosphère. • Diversité de la flore et de la faune. Adaptation des organismes vivants à leur habitat dans différentes zones climatiques. • Recherche et problèmes environnementaux.	–	• La richesse de la flore et de la faune de notre pays : diversité des espèces, facteurs qui la déterminent. • Caractéristiques de la flore et de la faune des divers systèmes naturels et économiques de notre pays. • Espaces naturels spécialement protégés de notre pays et de notre région. Sites du patrimoine mondial naturel de UNESCO ; les plantes et les animaux inscrits sur la liste rouge de votre pays.	–	• Des espaces naturels spécialement protégés comme l'un des éléments des objectifs de développement durable.
2.3. Les effets du changement climatique sur les forêts	–	• Environnement naturel. • Protection de la nature. • Espaces naturels spécialement protégés.	–	• L'industrie forestière et l'environnement. Problèmes et perspectives de développement.	–	• Réserves forestières du monde. • Déforestation – ses causes et les zones touchées.
2.4. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau	–	• Hydrosphère et méthodes de son étude. Parties de l'hydrosphère. • Rivières. Nutrition et régime de la rivière. • Lacs. Origine des lacs. Nutrition des lacs. • Phénomènes naturels dans l'hydrosphère, méthodes d'observation et protection.	• Salinité des eaux de surface de l'océan mondial, sa dépendance à l'égard du rapport des précipitations et de l'évaporation, l'influence des eaux fluviales et des eaux glaciaires. • Problèmes écologiques de l'océan mondial.	• Systèmes naturels aquatiques des : rivières de votre pays, mers, lacs. • Les phénomènes naturels hydrologiques dangereux et leur répartition sur le territoire. • Répartition inégale des ressources en eau. Augmentation de leur consommation et de leur pollution. Moyens de préserver la qualité des ressources en eau.	–	• Approvisionnement en eau douce. • Ressources hydroélectriques du monde. • Le rôle des ressources naturelles de l'océan mondial (énergétiques, biologiques, minérales) dans notre vie et les perspectives de leur utilisation.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le monde naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?						
2.5. Les effets du changement climatique sur l'agriculture	–	• Formation du sol et fertilité du sol. Protection des sols.	• Types d' activités économiques : agriculture.	• Ressources agroclimatiques. • Les ressources du sol dans votre pays. Des mesures pour préserver la fertilité des sols : remise en état des terres, lutter contre l'érosion des sols et la pollution terrestre.	• Agriculture. • Terre, sol et ressources agroclimatiques. • Agriculture et environnement. • Caractéristiques du secteur agro-industriel de votre région.	• Ressources agroclimatiques du monde. • L'impact de l'agriculture et ses activités individuelles sur l'environnement. • Différences géographiques dans la disponibilité des terres. • L'agriculture biologique. Agriculture agricole. Élevage des animaux.
2.6. Les effets du changement climatique sur les régions côtières	–	• L'océan mondial. • Mouvements des eaux de l'océan mondial : vagues ; courants, flux et reflux. • Phénomènes naturels dans l'océan mondial.	• Modifications de la couverture de glace et du niveau de la mer, leurs causes et conséquences. • Modèles de changements dans la salinité des océans. • Principales zones de pêche.	• La richesse de la flore et de la faune de notre pays : diversité des espèces, facteurs qui la déterminent. • Caractéristiques de la flore et de la faune des divers systèmes naturels et économiques de notre pays. • Espaces naturels spécialement protégés de notre pays et de notre région. Sites du patrimoine naturel mondial de l'Unesco ; les plantes et les animaux inscrits sur la Liste rouge de votre pays.	–	Élévation du niveau de la mer. • Pêche et aquaculture : caractéristiques géographiques.=
2.7. Les effets du changement climatique sur les régions montagneuses	–	• Zone altitudinale. • Préservation des biotopes les plus importants de la Terre.	• Glaciers. • Zones altitudinales des montagnes de votre pays.	–	–	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le monde naturel et les êtres humains. Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?						
2.8. Les effets du changement climatique sur la régions arctique	–	• Permafrost.	• L'Antarctique est un continent unique sur Terre. • Exploration humaine de l'Antarctique. Recherche moderne en Antarctique.	• Glaciers. • Pergélisol.	• Zone arctique. • Programme d'État pour le développement socio-économique de la zone arctique.	–
2.9. Les effets du changement climatique sur les villes et la santé	–	–	• Population mondiale actuelle. Facteurs influençant la croissance démographique. • Localisation et densité de la population.	• Caractéristiques géographiques de la répartition de la population. • Population urbaine et rurale. • Urbanisation dans votre pays. Les plus grandes villes et agglomérations urbaines.	–	• Le concept d'urbanisation ; ses caractéristiques dans des pays de différents types socio-économiques. • Agglomérations urbaines et mégalopoles du monde.
2.10. Les effets du changement climatique sur les problèmes sociaux	–	–	• L'influence des conditions climatiques sur la vie des gens. • Villes et établissements ruraux.	• L'influence du climat sur la vie et les activités économiques de la population. • Migrations externes et internes. Raisons de la migration et principales orientations de celle-ci.	–	• Les réfugiés climatiques. • Caractéristiques géographiques de la répartition de la population et facteurs qui la déterminent. Migrations de population : causes, principaux types et itinéraires migratoires.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?						
3.1. Les énergies « vertes » **3.1.1.Qu'est-ce que l'énergie** **3.1.2. Les principales sources d'énergie**	–	–	–	• Classifications des ressources naturelles. Capital en ressources naturelles et potentiel environnemental de votre pays. • Ressources minérales du pays et leur utilisation rationnelle	• Secteur énergétique. Industries du pétrole, du gaz et du charbon. • Industrie de l'énergie électrique.	• Capital de ressources naturelles des régions du monde et des grands pays. Approvisionnement des pays en pétrole, gaz, uranium, minerais et autres minéraux.
3.1.3. Les combustibles fossiles						–
3.1.4. L'énergie nucléaire				–		
3.1.5. Les énergies renouvelables	–	• Hydrosphere and people. Use of water energy by the humankind.	–	–	• Power plants using renewable energy sources, their features and share in electricity production.	• Secteur énergétique mondial : grandes étapes de développement, transition énergétique. • Pays à l'avant-garde dans le développement des énergies renouvelables.
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	–	–	–	• Principes et méthodes de gestion rationnelle de l'environnement..	• Principaux types de centrales électriques (nucléaires, thermiques, hydroélectriques, centrales utilisant des sources d'énergie renouvelables). • Impact du secteur énergétique sur l'environnement.	• Industrie énergétique mondiale. Tendances actuelles et caractéristiques géographiques du développement de l'industrie. • Impact environnemental de l'industrie électrique et des différents types de centrales électriques, y compris les centrales électriques à énergies renouvelables

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE						
Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?						
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie **3.2.1. Transports respectueux de l'environnement** **3.2.2. Appareils électroménagers et appareils électriques**	–	–	–	–	• Transport maritime, fluvial, ferroviaire, routier, aérien. • Transports et protection de l'environnement.	• Principales autoroutes internationales et pôles de transport.
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs **3.2.4. Les villes vertes**	–	–	–	–	• Développement économique et état de l'environnement. • Documents étatiques reflétant les enjeux de protection de l'environnement de votre pays et les mesures gouvernementales en faveur de la transition énergétique et du développement durable.	• Le concept d'urbanisation ; ses caractéristiques dans des pays de différents types socio-économiques. • Agglomérations urbaines et mégalopoles du monde.
3.3. L'empreinte carbone et comment puis-je aider la planète en réduisant mon empreinte carbone	–	–	• Modification de la nature induite par les activités économiques humaines.	–	–	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Géographie Contenu programmatique et thématique					
	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8	Niveau 9	Niveau 10
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?						
3.4. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable	–	–	• Interaction entre l'être humain et la nature sur différents continents. • La nécessité d'une coopération internationale dans l'utilisation de la nature et sa protection. Développement des activités de protection de l'environnement à l'heure actuelle. • Problèmes mondiaux de durabilité et efforts internationaux pour les résoudre. • Les Nations Unies et les objectifs de développement durable. • Patrimoine mondial de l'UNESCO : sites naturels et culturels	–	–	• Enjeux mondiaux : changement climatique global, catastrophes naturelles, pénurie des ressources en eau et détérioration de leur qualité, désertification des terres et dégradation des sols, conservation de la biodiversité. • Contamination de l'océan mondial et utilisation de ses ressources. • Moyens possibles pour résoudre les problèmes mondiaux. La contribution de votre pays à la résolution des problèmes mondiaux.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 1. Le problème du changement climatique					
1.1.. Le climat et le temps	**Niveau 5** • Méthodes scientifiques d'étude de la nature vivante : observation, expérimentation, description, mesure, classification. • Changements saisonniers dans la vie végétale. **Niveau 7** • Changements saisonniers dans la vie de la communauté végétale. **Niveau 11** • Facteurs abiotiques : lumière, température, humidité. Adaptation des organismes aux facteurs abiotiques. Rythmes biologiques.	**Niveau 7** • Sciences physiques Phénomènes naturels. • Grandeurs physiques. Mesure des grandeurs physiques. • États agrégés des choses. Caractéristiques des états agrégés de l'eau. • L'atmosphère terrestre et la pression atmosphérique. Raisons de l'existence de l'atmosphère terrestre. Mesurer la pression atmosphérique. Dépendance de la pression atmosphérique à l'altitude au-dessus du niveau de la mer. Instruments de mesure de la pression atmosphérique. **Niveau 8** • L'humidité de l'air. **Niveau 9** • Réflexion de la lumière. Loi de réflexion de la lumière..	**Niveau 8** • Propriétés physiques des substances. État agrégés des substances. • L'air est un mélange de gaz. Composition de l'air. • Oxydes. • Le cycle de l'eau dans la nature.	–	–
1.2 Types de climats et régions climatiques	**Niveau 5** • Zones naturelles de la Terre, leurs habitants. La flore et la faune des zones naturelles. **Niveau 7** • Plantes des zones naturelles du Terre. Flore. **Niveau 8** • Animaux des zones naturelles de La terre. Modèles de base de répartition des animaux sur la	–	**Niveau 8** • Le cycle de l'eau dans la nature.	–	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 1. Le problème du changement climatique					
1.3. Pourquoi et comment le climat a changé dans le passé	**Niveau 7** • « Fossiles vivants » du règne végétal. **Niveau 8** • Paléontologie. Restes fossiles d'animaux, leur étude. « Fossiles vivants » du monde animal. **Niveau 11** • La séquence d'apparition des espèces dans les archives fossiles. • Les principales étapes de l'évolution du monde organique sur Terre, le développement de la vie par époques et périodes.	**Niveau 9** • Propagation rectiligne de la lumière. Éclipses de Soleil et de Lune. • Réflexion de la lumière. Loi de réflexion de la lumière. **Niveau 11** • Système solaire. • Soleil. Activité solaire.	**Niveau 8** • Classification des réactions chimiques (composés, décomposition, substitution, échange).	–	–
1.4. Le changement climatique à notre époque	**Niveau 6** • Photosynthèse. • Respiration des plantes. • Formation d'anneaux de croissance dans les arbres. **Niveau 9** • Civilisation. • Changements technologiques dans l'environnement. **Niveau 11** • Cycles des substances (carbone, azote).	–	**Niveau 8** • Classification des réactions chimiques (composés, décomposition, substitution, échange). • Combustible : charbon et méthane. Pollution de l'air, augmentation de l'effet de serre, destruction de la couche d'ozone. **Niveau 9** • Carbone, répartition dans la nature, propriétés physiques et chimiques. Cycle du carbone dans la nature. • Problèmes environnementaux associés au carbone monoxyde, changement climatique mondial, effet de serre.	**Niveau 6** • Le lien entre les êtres humains et la nature. **Niveau 10** • Le caractère contradictoire du progrès.	**Niveaus 8 -11** • L'influence des activités humaines sur le milieu naturel. • Connaissance de l'environnement et gestion rationnelle des ressources

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.1. Les effets du changement climatique sur le temps	**Niveau 7** • Changements saisonniers dans la vie des plantes. **Niveau 9** • Dépendance de la santé humaine à l'égard de l'état de l'environnement. • Comportement respectueux de l'environnement et comportement dans les situations dangereuses et d'urgence.	**Niveau 8** • Vaporisation et condensation. Évaporation.	**Niveau 8** • Phénomènes physiques et chimiques. • Le cycle de l'eau dans la nature. **Niveau 9** • Cycle du carbone dans la nature. • Oxydes de carbone, leurs propriétés physiques et chimiques. Problèmes environnementaux associés au monoxyde de carbone, au changement climatique mondial, à l'effet de serre.	–	**Niveaux 8-11** • Urgences météorologiques : tempêtes, ouragans, tornades, pluies torrentielles, grêle, gel, chaleur. • Possibilités de prévision, d'alerte, d'atténuation des conséquences. Informer et alerter la population sur les situations d'urgence. • Règles de comportement sécuritaire. Conséquences des urgences météorologiques. • Évacuation de la population en cas d'urgence, la procédure pour la population.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.2. Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux	**Niveau 5** • Adaptation des organismes à leur environnement. Changements saisonniers dans la vie des organismes. • La notion de systèmes naturels. • Influence humaine sur la faune à travers l'histoire. • Moyens de préserver la diversité biologique. Aires protégées (réserves, sanctuaires, parcs nationaux, monuments naturels). Liste rouge de votre pays. **Niveau 7** • Développement évolutif du monde végétal sur Terre. • Protection de la flore. Restaurer le nombre d'espèces végétales rares : espaces naturels spécialement protégés. La Liste Rouge de votre pays. Mesures pour la conservation de la flore. **Niveau 8** • Diversité du monde animal. • Développement évolutif du monde animal sur Terre. • Espèces animales disparues • Restaurer le nombre d'espèces animales rares. • Mesures de conservation de la faune. **Niveau 11** • Évolution des espèces. • Communauté d'organismes – biocénose. Connexions dans la biocénose. • La notion d'écosystème et de biogéocénose. • La biodiversité comme facteur de durabilité des écosystèmes. Préservation de la diversité biologique sur Terre. • La conservation de la biodiversité comme base de la durabilité de la biosphère.	–	**Niveau 8** • Phénomènes physiques et chimiques. • Le rôle des solutions dans la nature et dans la vie humaine. • Le cycle de l'eau dans la nature. **Niveau 9** • Pollution chimique de l'environnement par des composés azotés (pluies acides, pollution de l'air, du sol et de l'eau). • Cycle du carbone dans la nature. • Les oxydes de carbone, leurs propriétés physiques et chimiques, leurs effets sur les organismes vivants.	**Niveau 11** • Législation environnementale. • Violations environnementales.	**Niveaux 8-11** • Les règles de conduite nécessaires pour réduire le risque de rencontre avec des animaux sauvages, la procédure à suivre lorsqu'on les rencontre ; que faire en cas de morsures d'animaux sauvages, de serpents, d'araignées, de tiques et d'insectes.

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.3. Les effets du changement climatique sur les forêts	**Niveau 6** • Photosynthèse. • Respiration des plantes. **Niveau 11** • Écosystème de forêts de conifères ou à feuilles caduques. • Les bases d'une utilisation rationnelle des ressources naturelles.	–	**Niveau 8** • Le cycle de l'eau dans la nature. **Niveau 9** • Cycle du carbone dans la nature. • Les oxydes de carbone, leurs propriétés physiques et chimiques, leurs effets sur les organismes vivants.	**Niveau 11** • Législation environnementale. • Violations environnementales.	**Niveaus 8-11** • Feux de forêt. Capacités de prévision et d'alerte. Règles pour un comportement sécuritaire. Conséquences des incendies de forêt pour les personnes et l'environnement.
2.4. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau	**Niveau 8** • Adaptation des poissons aux conditions environnementales. • L'importance du poisson dans la nature et dans la vie humaine. Importance économique du poisson. **Niveau 11** • Écosystèmes de rivières et des lacs.	–	**Niveau 8** •Phénomènes physiques et chimiques. • Acides et sels. • Oxydes. Propriétés des oxydes. • Propriétés physiques de l'eau. • L'eau est un solvant. Propriétés chimiques de l'eau. • Le rôle des solutions dans la nature et dans la vie humaine. • Le cycle de l'eau dans la nature. • Contamination de l'eau. Protection et purification des eaux douces. • Solubilité des substances dans l'eau. **Niveau 9** • Pollution chimique de l'environnement avec des composés azotés (pluies acides, air, sol et pollution de l'eau).	–	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.5. Les effets du changement climatique sur l'agriculture	**Niveau 5** • Changements dans la nature dus au développement de l'agriculture. Niveau 6 • Nutrition des plantes. • Le sol, sa fertilité. **Niveau 7** • Agriculture. Plantes cultivées des terres agricoles. **Niveau 8** Domestication des animaux. Animaux des terres agricoles. **Niveau 11** • Agroécosystèmes. • Importance biologique et économique des agroécosystèmes. • Les bases d'une utilisation rationnelle des ressources naturelles.	–	**Niveau 8** • Phénomènes physiques et chimiques. • Acides et sels. • L'eau est un solvant. • Propriétés chimiques de l'eau. • Le cycle de l'eau dans la nature. • Contamination des eaux. • Solubilité des substances dans l'eau. **Niveau 9** • Pollution chimique de l'environnement par des composés azotés (pluies acides, pollution de l'air, du sol et de l'eau).	**Niveau 6** • Les liens entre l'être humain et la nature	–
2.6. Les effets du changement climatique sur les régions côtières	**Niveau 8** • Gibier (pêche, chasse).	–	**Niveau 8** • L'eau est un solvant. Propriétés chimiques de l'eau.	**Niveau 6** • Le lien entre les êtres humains et la nature.	**Niveaus 8-11** • Urgences hydrologiques : inondations, tsunamis. • Possibilités de prévision, d'alerte, d'atténuation. • Règles de comportement sécuritaire. Conséquences des urgences hydrologiques.

SECONDARY EDUCATION

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.7. Les effets du changement climatique sur les régions montagneuses	–	–	–	**Niveau 6** • Le lien entre l'être humain et la nature.	**Niveaus 8-11** • Urgences géologiques : tremblements de terre, éruptions volcaniques, glissements de terrain, coulées de boue, chutes de pierres, avalanches. • Possibilités de prévision, d'alerte, d'atténuation. • Règles de comportement sécuritaire. • Conséquences des urgences géologiques.
2.8. Les effets du changement climatique sur la région arctique	–	**Niveau 7** • États agrégés de la matière : structure des gaz, des liquides et des solides corps (cristallins). Caractéristiques des états agrégatifs de l'eau.	**Niveau 8** • Propriétés physiques des substances. État agrégé des substances. • Phénomènes physiques et chimiques • Propriétés chimiques de l'eau. • Solubilité des substances dans l'eau.	**Niveau 6** • Le lien entre l'être humain et la nature.	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 2. Les effets du changement climatique sur le milieu naturel et les êtres humains Pouvons-nous nous adapter aux conséquences inévitables du changement climatique ?					
2.9. Les effets du changement climatique sur les villes et la santé	**Niveau 7** • Les plantes de la ville, caractéristiques de la flore urbaine. Parcs, parcs forestiers, jardins botaniques. **Niveau 8** • La ville comme un environnement artificiel spécial créé par l'homme. • Espèces synanthropes d'animaux. Leurs conditions de vie • Pression causée par les loisirs sur les animaux sauvages dans la ville. **Niveau 9** • Urbanisation. **Niveau 11** • Écosystèmes urbains. Importance biologique et économiques des écosystèmes urbains.	**Niveau 10** • Technologies de production de matériaux modernes, notamment les nanomatériaux et les nanotechnologies.	**Niveau 8** • Le cycle de l'eau dans la nature. • Contamination de l'eau. • Solubilité des substances dans l'eau. **Niveau 9** • Oxydes de carbone, leurs propriétés physiques et chimiques. • Problèmes environnementaux associés au monoxyde de carbone, au changement climatique global, à l'effet de serre.	–	**Niveaus 8-11** • Méthodes de protection contre la surchauffe et l'hypothermie dans différentes conditions. Premiers secours en cas de surchauffe, d'hypothermie et d'engelures.
2.10. Les effets du changement climatique sur les problèmes sociaux	–	–	**Niveau 9** • Pollution chimique de l'environnement par des composés azotés (pluies acides, pollution de l'air, du sol et de l'eau).	**Niveau 6** • Le lien entre la société et la nature. • Communautés et groupes sociaux. La position d'une personne dans la société. **Niveau 11** • Inégalité sociale. • Processus de migration dans le monde moderne.	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?					
3.1. Les énergies vertes **3.1.1. Qu'estce que l'énergie ?** **3.1.2. Les principales sources d'énergie**	**Niveau 7** • Le rôle des fougères anciennes dans la formation du charbon.	**Niveau 8** • Carburants. Principes de fonctionnement des moteurs thermiques. Moteurs thermiques et protection de l'environnement. **Niveau 11** • Production, transport et consommation d'énergie électrique.	**Niveau 11** • Le rôle de la chimie dans la garantie de la sécurité environnementale et énergétique.	**Niveau 6** • Ressources et économie de votre pays	–
3.1.3. 3.1.3. Les combustibles fossiles	–	–	**Niveau 8** • Combustible : charbon et méthane. Pollution de l'air, augmentation de l'effet de serre, destruction de la couche d'ozone. **Niveau 9** • Premiers concepts sur les substances organiques comme composés carbonés (méthane, éthane, etc.) • Les sources naturelles d'hydrocarbures (charbon, gaz naturel, pétrole), leurs produits transformés (essence), leur rôle dans la vie quotidienne et dans l'industrie. **Niveau 10** • Sources naturelles d'hydrocarbures et leur transformation. • Gaz naturel. Gaz de pétrole associés. Le pétrole et son origine. Méthodes de raffinage du pétrole : distillation, craquage (thermique, catalytique). Produits pétroliers, leur utilisation dans l'industrie et la vie quotidienne. • Charbon et produits de sa transformation.	**Niveau 6** • Ressources et économie de votre pays	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?					
3.1.4. L'énergie nucléaire	–	**Niveau 9** • Énergie nucléaire. **Niveau 11** • Problèmes et perspectives de l'énergie nucléaire.	–	–	–
3.1.5. Les énergies renouvelables	–	**Niveau 8** • Méthodes de production d'énergie électrique. • Centrales électriques utilisant des sources d'énergie renouvelables.	–	–	–
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	–	**Niveau 9** • Effets des rayonnements sur les organismes vivants. **Niveau 10** • Problèmes environnementaux de l'industrie électrique. **Niveau 11** • Risques environnementaux lors de la production d'électricité. • Aspects environnementaux de l'énergie nucléaire.	**Niveau 9** • Les sources naturelles d'hydrocarbures (charbon, gaz naturel, pétrole), leurs produits transformés (essence), leur rôle dans la vie quotidienne et dans l'industrie.	**Niveau 6** • Ressources et économie de votre pays	–

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?					
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie **3.2.1. Transports respectueux de l'environnement** **3.2.2. Appareils électroménagers et appareils électriques**	–	**Niveau 8** • Circuits électriques et consommateurs d'énergie électrique dans la vie quotidienne. • Utilisation de moteurs électriques dans les appareils techniques et les transports. **Niveau 10** • Appareils de chauffage et d'éclairage électriques – conception technique et application pratique. • Dispositifs techniques et application pratique : moteur à combustion interne, réfrigérateur domestique, climatiseur. **Niveau 11** • La culture de l'utilisation de l'électricité au quotidien	**Niveau 9** • Sources naturelles d'hydrocarbures et produits de leur transformation (essence), leur rôle dans la vie quotidienne et les industries.	**Niveau 10** • Vision du monde, son rôle dans la vie humaine. • Comportement économique rationnel. • Activités économiques et développement durable. **Niveau 11** • Législation environnementale. • Violations environnementales.	**Niveaus 8-11** • L'influence des activités humaines sur le milieu naturel. • Connaissance de l'environnement et gestion rationnelle de l'environnement.
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs **3.2.4. Villes vertes**	**Niveau 7** • Les plantes de la ville, caractéristiques de la flore urbaine. Parcs, parcs forestiers, jardins botaniques.	–	**Niveau 9** • Les matériaux de construction les plus importants : céramique, verre, ciment, béton, béton armé. Problèmes d'utilisation sûre des matériaux de construction dans la vie quotidienne. • Les alliages (acier, fonte, duralumin, bronze) et leur utilisation dans la vie quotidienne et dans l'industrie. **Niveau 11** • Propriétés physiques générales des métaux. L'utilisation des métaux dans la vie quotidienne, la nature et la technologie. Les alliages de métaux.	**Niveau 6** • Le lien entre les êtres humains et la nature. **Niveau 11** • Législation environnementale. Violations environnementales	**Niveaus 8-11** • L'influence des activités humaines sur le milieu naturel. • Connaissance de l'environnement et gestion rationnelle de l'environnement

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire du Module sur le Climat	Contenu programmatique et thématique				
	Biologie	Physique	Chimie	Sciences sociales	Fondamentaux de la sécurité
PARTIE 3. Comment éviter les changements climatiques dangereux ?					
3.3. L'empreinte carbone et comment puis-je aider la planète en réduisant mon empreinte carbone	**Niveau 11** • Méthodes de recherche environnementale. • Point de vue écologique des personnes vivant dans le monde contemporain	**Niveau 11** • La culture de l'utilisation de l'électricité dans la vie quotidienne.	**Niveau 8** • Phénomènes physiques et chimiques. **Niveaus 10** • Plastiques. • Caoutchoucs naturels et synthétiques. • Fibres : naturelles (coton, laine, soie), artificielles (fibre d'acétate viscose), synthétiques (nylon et lavsan). **Niveau 11** • Les êtres humains dans le monde des substances et des matériaux. • Connaissances en matière de produits chimiques ménagers.	**Niveau 6** • Le lien entre les êtres humains et la nature. **Niveau 7** •Évaluation morale du comportement des gens et de votre propre comportement. **Niveau 10** • Vision du monde, son rôle dans la vie humaine. • Comportement économique rationnel.	**Niveaus 8-11** • L'influence des activités humaines sur le milieu naturel. • Connaissance de l'environnement et gestion rationnelle de l'environnement.
3.4. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable et une approche associant l'ensemble de la société pour faire face au changement climatique	**Niveau 9** • L'importance de la protection de l'environnement pour la préservation de l'humanité. **Niveau 11** • Changements anthropiques dans la biosphère. Problèmes écologiques mondiaux.	–	**Niveau 8** • Protection et purification de l'eau douce. **Niveau 9** • Problèmes environnementaux associés au monoxyde de carbone, au changement climatique global, à l'effet de serre.	**Niveau 6** • Renforcer les relations entre les pays et les peuples dans la société moderne. • Problèmes mondiaux de notre époque et possibilités de les résoudre grâce à la collaboration de la communauté internationale et des organisations internationales. **Niveau 9** Problèmes mondiaux et solutions éventuelles. La situation environnementale et les moyens de l'améliorer.	**Niveaus 8-11** • Urgences environnementales. Possibilités de prévision, d'alerte, d'atténuation des conséquences.

LISTE DES ILLUSTRATIONS

- Couverture. Natan Giuliano.
- P.2. Mascot : Anna Alekperova et Natan Giuliano.
- P.6. Anna Alekperova, Natan Giuliano et PNUD-GCF “Armenia’s National Adaptation Plan” Project
- P. 7. Photo de courtoisie, T. Stocker.
- P. 9-10. Natan Giuliano.
- P. 12. Fig. 1.1. : NASA, https ://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/
- P.14. Fig. 1.2. : Rapport d’évaluation du GIEC 6. Changement climatique 2023. Rapport de synthèse/IPCC Assessment Report 6. Climate Change 2023. Synthesis Report : https ://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/ report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf
- P. 16. Fig. 1.1.1. : Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. Carte mondiale mise à jour de la classification climatique de Köppen-Geiger (Asie centrale). Wikipédia. Photo dans le bas, Shutterstock.com.
- P. 17. Photo : P. Kosmider, Shutterstock.com.
- P. 18. Fig. 1.2.1. : Wikipedia.
- P. 20. Table 1.2.1 : élaborée par l’auteur.
- P. 21. Photo (haut) : R. Loesche, Shutterstock.com. Photo (centre) : Semork, Shutterstock.com. Photo (bas) : apdesign, Shutterstock.com.
- P. 22. Photo (haut) : A. Latsun, Shutterstock.com. Photo (bas) : R. Donar, Shutterstock.com.
- P. 23. Photo (haut) : Susan R. Serna, Shutterstock.com. Photo (bas) : Axily, Shutterstock.com.
- P. 24. Fig. 1.2.2. : NASA. Fig. 1.2.3. : T. Skambos, National Research Centre for Snow and Ice, USA. Fig. 1.2.4. : I. Frolov, Arctic and Antarctic Institute. Fig. 1.2.5. : J. Sullivan, Wikipedia
- P. 27. Mots croisés : Elaborée par l’auteur sur la base de la version russe par S. Korshchikova.
- P. 28. Fig. (gauche) : M. Anton, bibliothèque publique des sciences, publiée sur Wikipédia. Photo (droite) : H. Grobe, Wikipedia. Fig. 1.3.1. : A.O. Kokorin, E.V. Smirnova, D.G. Zamolodchikov. Changement climatique. Livre destiné aux professeurs du secondaire. - Mosco : WWF, 2013. 220 pp.
- P. 29. Fig. 1.3.2. : Photo (gauche et droite supérieure) M. Dunn, NOAA Bureau du programme climatique, NABOS 2006 Expedition. Photo (droite inférieure) : L. Koenig, NASA.
- P. 30. Fig. 1.3.3. : A. Alekperova. Fig. 1.3.4. : http ://school-collection.lyceum62.ru.
- P. 31. Fig. : Catmando, Shutterstock.com.
- P. 32. Fig. 1.3.5. : J. Hansen and M. Sato, 2011 : Paleoclimate implications for human-made climate change. In Climate Change : Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects. Berger, Andre ; Mesinger et al. - Springer, 2012. - 270 pp. http ://www.springer.com/.
- P. 33. Fig. 1.3.6. : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC/Changement climatique 2013 : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Cinquième Rapport d’évaluation du GIEC. T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. www.ipcc.ch. Fig. 1.3.7. : R. Blakey, http ://www.cpgeosystems.com.
- P. 35. Fig. 1.3.8. : http ://www.britishmuseum.org.
- P. 36. Photo : A. Jack, Shutterstock.com. Fig. 1.3.9. : http ://earthobservatory.nasa.gov/.
- P.37. Photo : Y. Kumsri, Shutterstock.com.
- P. 40. Fig. 1.4.1. : IPCC, 2021 : Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ GIEC, 2021 : Changement climatique 2021 : la base des sciences physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https ://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- P. 41. Fig. 1.4.2. : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. / Changement climatique 2013 : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d’évaluation du GIEC. T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. www.ipcc.ch.
- P. 42. Fig. 1.4.3. : http ://climate.nasa.gov/evidence/.
- P. 43. Fig. 1.4.4. : A.O. Kokorin, E.V. Smirnova, D.G. Zamolodchikov, Changement climatique. Livre destiné aux professeurs du secondaire. - Moscow : WWF, 2013. - 220 pp.
- P. 44. Fig. 1.4.5. : The World Meteorological Organization, 2023./ L’Organisation météorologique mondiale, 2023 https ://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2023-smashes- global-temperature-record. Fig. 1.4.6. : The World Meteorological Organization, State of Global Climate 2022/ : Organisation météorologique mondiale, État du climat mondial 2022 : https ://public.wmo.int/ en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate.
- P. 45. Fig. 1.4.7. : Photos de gauche à droite : Saiho/Pixabay, olegkamenskij20120/Pixabay, USGS. Image design : NASA. JPL-Caltech
- P. 46. Fig. 1.4.8. : D. Belyukin, http ://www.belukin.ru/
- P. 48. Fig. 1.4.9. : IPCC, 2021 : Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/GIEC, 2021 : Changement climatique 2021 : les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https ://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf
- P. 50. Photo : H. Grobe, Wikipedia.
- P. 52. Photo (supérieure gauche) : Wikipedia. Photo (supérieure droite) : Wutthichai, Shutterstock.com. Photo (inférieure gauche) : pmau, Wikipedia. Photo (inférieure droite) : P. Litovchenko.

- P. 53. Fig. 2.1. : A. Alekperova, V. Berdin, Y. Dobrolyubova, Y. Kalinicheva, A. Kokorin.
- P. 54. Fig. 2.2. : World Resource Institute/ Institut des ressources mondiales (https ://wri-indonesia.org/en/insights/10-big-findings-2023-ipcc-report-climate-change) qui se réfère à IPCC, 2022 : Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ GIEC, 2022 : Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, et al. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. https ://report.ipcc.ch/ ar6/wg2/ IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- P. 55. Fig. 2.3. : IPCC, 2022 : Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ GIEC, 2022 : Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, et al. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. https ://report.ipcc.ch/ ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- P. 58. Fig. 2.4. : PNUD-FVC Projet « Plan national d'adaptation de l'Arménie »
- P. 59. Fig. 2.1.1. : V. Kantor.
- P. 60. Fig. 2.1.2. : Earth Observatory to the NASA/ Observatoire de la Terre auprès de la NASA, Lauren Dauphin.
- P. 61. Photo (gauche supérieure) : http ://earthobservatory.nasa.gov/. Photo (droite supérieure) : T. Shoemake, Shutterstock.com. Photo (gauche inférieure) : Wikipedia. Photo (droite inférieure) : B. Sosnovy, Shutterstock.com.
- P. 63. Fig. 2.1.3. : Muhammad J. Elalwany/AP.
- P. 65. Fig. 2.1.4. : Natan Giuliano, basé sur la NASA, Fait, Facts, https ://climate.nasa.gov/extreme-weather
- P. 68. Photo : crédit photographique Jose Jimenez/Getty Images
- P. 69. Photo (haut) : D.J. Rao, Shutterstock.com. Photo (bas) : T. Th. Walther, Wikipedia.
- P. 71. Photo : ChameleonsEye, Shutterstock.com.
- P. 72. Photo (gauche) : https ://unsplash.com/. Photo (droite) : S. Tulinov.
- P. 73. Photo (haut) : Wikipedia. Photo (bas) : MarcusVDT, Shutterstock.com.
- P. 74. Collage : A. Alekperova, basé sur des illustrations de Wikipédia.
- P. 77. Photo (première) : Xocolatl, Wikipedia. Photo (seconde) : N. Tomura, Wikipedia. Photo (troisième) : Wilson44691, Wikipedia. Photo (quatrième) : D. Bogdanov, Wikipedia.
- P. 78. Photo (haut) : jamon jp, Wikipedia. Photo (bas) : P. Kapitola, State Phytosanitary Administration, Bugwood.org.
- P. 79. Photo (haut) : Fraan, Photobucket.com. Photo (bas) : Musée national d'histoire naturelle Smithsonian.
- P. 80. Photo (haut) : Vlad61, Shutterstock. com. Photo (bas) : S. Baron, Wikipedia.
- P. 81. Photo (première) : S. Uryadnikov, Shutterstock.com. Photo (seconde) : martinhlavacek79, Shutterstock.com. Photo (troisième) : Argus fin, Wikipedia.
- P. 82. Photo (haut) : edmon, Shutterstock.com. Photo (bas) : elitravo, Shutterstock.com.
- P. 83. Photo (inférieure gauche) : M. Opp, Wikipedia. Photo (inférieure centre) : Silky, Shutterstock.com. Photo (inférieure droite) : freestock.ca.
- P. 84. Photo (première) : Lorcel, Shutterstock.com. Photo (seconde) : https ://unsplash.com/. Photo (troisième) : MarkVanDykePhotography, Shutterstock.com. Photo (quatrième) : L. Galuzzi
- P. 85. Photo (haut) : S. Myatyashev, http ://stasmat.livejournal.com/15402.html ?thread=77610. Photo (inférieure gauche) : Forestry department Rothaarge-birge. Photo (inférieure droite) : M. Manske, Wikipedia.
- P. 86. Photo (première) : SNEHIT, Shutterstock.com. Photo (seconde) : http ://www.destination360.com/north-america/us/utah/ zion- national-parklodg- ing. Photo (troisième) : http ://www.taganay.org. Photo (quatrième) : A. Martynova, Shutterstock.com.
- P. 87. Photo : http ://pohod.h12.ru/FOTOAlbom/Taganay/f_t_21.jpg.
- P. 88. Photo (gauche et droite) : http ://www.laparios.com/.
- P. 89. Photo : UICN
- P. 90. Fig. 2.2.1. : Commission mondiale sur l'adaptation 2019 et WRI.
- P. 93. Fig. 2.3.1. : Source : MA 2005. Carte conçue par Emmanuelle Bournay, Paris.
- P. 94. Fig. 2.3.2. : http ://blog.pershyn.name/2011/09/2011.html.
- P. 95. Fig. 2.3.3 et 2.3.4. : D. Zamolodchikov.
- P. 96. Fig. 2.3.5. : Shiyatov, 2009. Photo (bas) : El Misti, Wikipedia.
- P. 97. Fig. 2.3.6. : J.F. Stuefer, Wikipedia.
- P. 98. Fig. 2.3.7. : Fishlin et al., 2007.
- P. 99. Fig. 2.3.8. (gauche) : www.rosleskhoz.gov.ru. (droite) : https ://unsplash.com/. Fig. 2.3.9. : D. Zamolodchikov.
- P. 100. Fig. 2.3.10. : D. Zamolodchikov.
- P. 102. Fig. 2.3.11. : D. Zamolodchikov. Fig. 2.3.12 et 2.3.13. : V. Kaganov.
- P. 103. Fig. 2.3.14. : D. Zamolodchikov.
- P. 104. Fig. 2.3.15. : D. Zamolodchikov.
- P. 105. Fig. 2.3.16. : V. Kaganov.
- P. 106. Fig. 2.3.17. et Fig. 2.3.18. : D. Zamolodchikov.
- P. 107. Fig. 2.3.19. : The State of the Forests of Papua New Guinea/ L'état des forêts de Papouasie-Nouvelle-Guinée, 2008.
- P. 108. Photo : A. Fedorov, Shutterstock.com.
- P. 110. Fig. 2.3.20 et 2.3.21. : D. Zamolodchikov.
- P. 114. Photo (haut) : T. Spider, Shutterstock.com. Fig. 2.4.1. : http ://www.astronet.ru/db/msg/1224153.
- P. 115. Fig. 2.4.2. : GIEC, 2022 : Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, et al. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. https ://report.ipcc.ch/ ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- P. 116. Photo (haut) : S. Tulinov. Photo (gauche inférieure) : L. Nunes, Wikipedia. Photo (droite infèrieure) : G. Paire, Shutterstock.com.

- P. 117. Fig. 2.4.3. : IPCC, 2022 : Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ GIEC, 2022 : Changement climatique 2022 : impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, et al. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp. https ://report.ipcc.ch/ ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- P. 118. Fig. 2.4.4. : Wikipedia.
- P. 119. Fig. 2.4.5 : Wikipedia (gauche). N. Palmer, International Center for Tropical Agriculture/ Centre international d'agriculture tropicale (CIAT), http ://flickr.com/photos/38476503@ N08/5641586406 (right). Fig. 2.4.6 : E. Harrison, National Geographic Magazine, Volume 31 (1917), page 272 (gauche). Rjruiziii, Wikipedia (droite). Fig. 2.4.7. : Katvic, Shutterstock.com.
- P. 120. Fig. 2.4.8. : Water Supply report by National Climate Assessment/ Rapport sur l'approvisionnement en eau par l'évaluation nationale du climat, USA. http ://nca2014.globalchange.gov/report. Fig. 2.4.9. : A. Bezlepkin.
- P. 121. Fig. 2.4.10. : Octal, Wikipedia.
- P. 122. Fig. 2.4.11. : BK Bates et al. Climate change and water resources. IPCC Technical Paper. / hangement climatique et ressources en eau. Document technique du GIEC. – Genève 2008.
- P. 124. Photo : N. Palmer, Wikipedia.
- P. 125. Photo : V. Salman, Shutterstock.com.
- P. 126. Photo : Ratikova, Shutterstock.com.
- P. 127. Photo (gauche supérieure) : R. Jary, Shutterstock.com. Photo (droite supérieures) : Gleizes, Photo (centre) : I. Strukov, Shutterstock.com. Photo (bas) : J. Tran, Shutterstock.com.
- P. 128. Photo : A. Bondarets, Shutterstock.com.
- P. 129. Fig. 2.5.1. : https ://heliovolt.net/blog/smart-irrigation-system-techniques-a-step-ahead-in-water-conservation/
- P. 131. Photo : B. Jevtic, Shutterstock.com.
- P. 132. Photo : zstock, Shutterstock.com.
- P. 133. Fig. 2.6.1. : S. Tulinov. Fig. 2.6.2. : JaySi, Shutterstock.com.
- P. 134. Fig. 2.6.3. : R. Rowley, J. Kostelnick, D. Braaten et al. Risk of rising sea level to population and land area/ Risque d'élévation du niveau de la mer pour la population et les terres émergées. 2007.
- P. 135. Fig. 2.6.4. : Z. Pereira da Mata, Shutterstock.com. Photo (bas) : R. Whitcombe, Shutterstock.com.
- P. 136. Fig. 2.6.5. : Wikipedia. Fig. 2.6.6. : A. Kolotilin, WWF Russie. Fig. 2.6.7. : N. Mitchell, Shutterstock.com.
- P. 137. Fig. 2.6.8. : Evaluation report 'Key environmental and socio-economic effects of climate change in permafrost areas : a forecast based on synthesis of observations and modelling'/ Rapport d'évaluation « Principaux effets environnementaux et socio-économiques du changement climatique dans les zones de permafrost : une prévision basée sur la synthèse des observations et de la modélisation ». Ed. O. Anisimov. - SPb. : State Hydrological Institute, 2009. Fig. 2.6.9. : M. Grigoriev (ibid). Photo (bas) : Lippert Photography, Shutterstock.com.
- P. 138. Photo : AlinaMD, Shutterstock.com. Fig. 2.6.10. : http ://peakwatch.typepad.com/.a/6a00d83452403c69e20154358c6598970c-pi.
- P. 139. Fig. 2.6.11. : Changement climatique 2013 : Les preuves scientifiques. Contribution du groupe de travail au cinquième rapport d'évaluation du GIE/ T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. www.ipcc.ch. Fig. 2.6.12. : graph : http ://oceanadapt.rutgers.edu/, hoto de bar noir : Encyclopaedia Britannica, http ://global.britannica.com/media/full/530475/132944.
- P. 140. Photo (à partior de la gauche) : ermess, Shutterstock.com. Photo (droite) : withGod, Shutterstock.com.
- P. 142. Photo : S. Ilyas, Wikipedia.
- P. 143. Photo : momanuma, Shutterstock.com.
- P. 144. Fig. 2.7.1. : A. Alekperova etYu. Dobrolyubova utilisant des informations de http ://900igr.net/datai/geografija. Photo (gauche) : https :// unsplash.com/. Photo (droite) : https ://unsplash.com/.
- P. 145. Fig. 2.7.2. : Wikipedia. Fig. 2.7.3. : A. Egorov, Shutterstock.com.
- P. 146. Fig. 2.7.4. : Le Service mondial de surveillance des glaciers (WGMS)
- P. 147. Fig. 2.7.5. : Wikipedia.
- P. 148. Fig. 2.7.6. : Le Service mondial de surveillance des glaciers (WGMS) : https ://wgms.ch/global-glacier-state/. Fig. 2.7.7. : M. Hëltsle, University of Zurich, the World Glacier Monitoring Service (WGMS). Fig. 2.7.8. : NASA. Fig. 2.7.9. : NASA.
- P. 149. Fig. 2.7.10. : Y. Dobrolyubova.
- P. 150. Fig. 2.7.11. : V. Kantor.
- P. 151. Photo (left) : A. Gl, Shutterstock.com. Photo (droite) : M. Topchiy, Shutterstock.com. Fig. 2.7.12. A. Alekperova, Y. Dobrolyubova
- G. Tushinskaya.
- P. 152. Fig. 2.7.13. : (haut) : M. Topchiy, Shutterstock.com. (Bas) : V. Kantor. Fig. 2.7.14. : L. Gridinoc, Wikipedia.
- P. 153. Fig. 2.7.15. : Photo (gauche) : ANA Peru. Photo (droite) : Dtarazona, Wikipedia.
- P. 154. Fig. 2.7.16. : NASA. Fig. 2.7.17. : Contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du GIEC, 2007
- . M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof et al. - Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, USA.
- P. 155. Photo (gauche) : Pikoso.kz, Shutterstock.com. Photo (droite) : D. Lynch, Shutterstock.com.
- P. 157. Reproduction photographique : Wikipedia.
- P. 159. Photo : S. Dobrolyubov.
- P. 160. Fig. 2.8.1. : http ://www.athropolis.com/map2.htm.
- P. 162. Fig. 2.8.2. : GIEC, 2021 : Changement climatique 2021 : les preuves scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https ://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_ FullReport.pdf

- P. 163. Fig. 2.8.3. : Studio de visualisation scientifique NASA/Goddard Space Flight Center. Les données Blue Marble nous ont été courtoisement transmises par d Reto Stockll.
- P. 164. Fig. 2.8.4. : A. Kokorin, WWF Russia.
- P. 165. Photo : J. McDonald, Shutterstock.com. Fig. 2.8.5. : C. Accardo, AP Photo/NOAA.
- P. 166. Photo : D. Pilipenko, Shutterstock.com.
- P. 167. Fig. 2.8.6. : J. Shaw, http ://www.johnshawphoto.com/.
- P. 168. Fig. 2.8.7. : N. Shiklomanov. Rapport d'évaluation : 'Key environmental and socio-economic impacts of climate change in permafrost areas : a forecast based on synthesis of observations and modelling'/ Principaux impacts environnementaux et socio-économiques du changement climatique dans les zones de permafrost : une prévision basée sur la synthèse des observations et de la modélisation »
- . Ed. O. Anisimov. SPb. : Institut hydrologique d'État, 2009. Fig. 2.8.8. : ibid. Fig. 2.8.9. : D. Drozdov, ibid.
- P. 169. Fig. 2.8.10. : V. Romanovsky, ibid. Fig. 2.8.11. : M. Grigoriev, ibid.
- P. 170. Fig. 2.8.12. : V. Romanovsky, Past and Present and Future Changes in Permafrost and Implications for a Changing Carbon Budget. Environmental Science Seminar Series/ Changements passés, présents et futurs du pergélisol et implications pour un budget carbone qui se modifie. Série de séminaires sur les sciences de l'environnement, 2008, American Meteorological Society.
- P. 171. Fig. 2.8.13. et 2.8.14. : N. Shiklomanov, Evaluation report : Key environmental and socio-economic impacts of climate changes in perma- frost areas : a forecast based on the synthesis of observations and modelling/ Rapport d'évaluation : Principaux impacts environnementaux et socio-économiques des changements climatiques dans les zones de pergélisol : une prévision basée sur la synthèse des observations et de la modélisation. Ed. O. Anisimov. SPb. : State Hydrological Institute, 2009.
- P. 172. Fig. 2.8.15. : Photo (gauche) : G. Baturova ; Photo (droite) : A. Walk, Wikipedia.
- P. 173. Photo (gauche) : https ://unsplash.com/. Photo (droite) : https ://unsplash.com/
- P. 174. Fig. 2.8.16. : IPCC, 2021 : Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ GIEC, 2021 : Changement climatique 2021 : la base des sciences physiques. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https ://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_ FullReport.pdf
- P. 175. Photo : S. Dobrolyubov
- P. 178. Fig. 2.9.1. : F. Schmidt, Ellen J. Beer et al. (eds.), Berns grosse Zeit.
- P. 179. Photo : KPG_Payless, Shutterstock.com. Fig. 2.9.2. : A. Alekperova et Y. Dobrolyubova using https ://population.un.org/wup/Maps/.
- P. 180. Table 2.9.1. : A. Alekperova using World Urbanization Study, 2018. https ://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdfand. Fig. 2.9.3. : https ://unsplash.com/.
- P. 181. Photo (gauche) : 1000 Words, Shutterstock.com. Photo (right) : P. Rogat, Shutterstock.com.
- P. 182. Fig. 2.9.4. : US Global Change Research Program (USGCRP)/ Programme américain de recherche sur le changement global, 2009. Reproduction du tableau (en bas) : Wikipédia.
- P. 183. Fig. 2.9.5. : Centre for Health Research School of Medicine/ Centre de recherche en santé École de médecine, http ://climatehealthcluster.org/wp-content/uploads/2013/06/ Bambrick_Hi- lary_080813.pdf.
- P. 185. Photo : ChameleonsEye, Shutterstock.com.
- P. 186. Photo (à partir de la gauche) : SW Stock, Shutterstock.com. Photo (droite) : A. Ruzhin, Shutterstock.com.
- P. 187. Fig. 2.9.6. : B. Revich.
- P. 189. Fig. 2.9.7. : The Nature Conservancy/ La conservation de la nature, photo de Greg Kahn : https ://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/ perspectives/stormwater-solutions-investing-in-nature-and-communities
- P. 191. Photo : https ://unsplash.com/.
- P. 192. Photo (left) : anandoart / Shutterstock. Photo (right) : Wikipedia.
- P. 193. Photo (lgauche) : https ://unsplash.com/. Photo (droite) : G. Paire, Shutterstock.com.
- P. 195. Photo (haut) : H. Conesa, Shutterstock.com. Photo (bas) : P. HaSon, Shutterstock.com.
- P. 197. Fig. 2.10.1. : T. Hakala, Shutterstock.com. Fig. 2.10.2. : S. Gulec, Shutterstock.com. Fig. 2.10.3. : R. Whitcombe, Shutterstock.com.
- P. 198. Photo : VVO, Shutterstock.com.
- P. 199. Fig. 2.10.4. : UNDP report/Rapport du PNUD, Charting a New Low-Carbon Route to Development/ Tracer une nouvelle voie vers un développement à faibles émissions de carbone. - Moscow : UNDP, 2009.
- P. 203. Fig. 3.1.1. : tiré des documents de keelingcurve.uesd.edu.
- P. 207. Fig. 3.1.2. : A. Alekperova, E. Gracheva, Yu. Dobrolyubova.
- P. 208. Fig. 3.1.3. : tno.nl.
- P. 209. Photo (gauche) : huyangshu, Shutterstock.com. Photo (right) : https ://unsplash.com/.
- P. 210. Fig. 3.1.4. : A. Alekperova. Photo : N. Vinokurov, Shutterstock.com.
- P. 211. Fig. 3.1.5. : IEA, 2021. www.iea.org.
- P. 212. Photo (haut) : K. Black, Wikipedia. Photo (bas) : avec l'aimable autorisation des auteurs
- P. 213. Fig. 3.1.6. : http ://www.world-nuclear.org/. Table 3.1. Based on European Union data.
- P. 214. Fig. : A. Alekperova.
- P. 215. Photo (haut) : overcrew, Shutterstock.com. Photo (bas) : KPG Payless2, Shutterstock.com.
- P. 216. Photo : M. Lisner, Shutterstock.com.
- P. 217. Fig. 3.1.7. : both Wikipedia.
- P. 218. Table 3.2. : IRENA, 2022.
- P. 219. Photo : CSIRO, http ://www.scienceimage.csiro.au/pages/about/.

- P. 220. Photo : Chixoy, Wikipedia.
- P. 221. Photo : Wikipedia.
- P. 222. Photo (gauche) : Y. Dobrolyubova. Photo (right) : avec l'aimable autorisation des auteurs.
- P. 223. Photo : D. Dixon, Geograph project collection : https :// www.geograph.org.uk/photo/2391702
- P. 224. Fig. 3.1.7. : Wikipedia (les deux photos).
- P. 225. Photo : Arnold C., Wikipedia. Fig. 3.1.8. : Wikipedia.
- P. 226. Fig. 3.1.9. M. Grmek, Wikipedia. Fig. 3.1.10. : Le Grand Portage, Wikipedia. Fig. 3.1.11. : Wikipedia.
- P. 227. Photos : http ://oceanrusenergy.ru/Gallery.
- P. 228. Photo : Dani 7C3, Wikipedia.
- P. 229. Photo (haut) : S. Tulinov. Fig. 3.1.12. : avec l'aimable autorisation des auteurs.
- P. 231. Photos : Wikipedia.
- P. 232. Photo (gauche inférieure) : K. Stuchelova, Shutterstock.com. Photo (cnetre inférieure) : images72, Shutterstock.com. Photo (droite inférieure) : Bildagentur Zoonar GmbH, Shutterstock.com.
- P. 233. Fig. 3.1.13. : BiofuelsNet : https ://biofuelnet.ca/about-biofuels/infographics/.
- P. 234. Fig. 3.1.14. : R Sabbatini, Wikipedia. Fig. 3.1.15. : Natecull, Wikipedia. Photo (première dans le bas) : indogolotus, Shutterstock.com. photo (seconde dans le bas) : Dickelbers, Wikipedia.
- P. 241. Fig. 3.2.1. : A. Alekperova.
- P. 242. Photo : A. Alekperova.
- P. 243. Photo : A. Alekperova.
- P. 245. Fig. 3.2.2. : Energy Efficiency in Russia : Hidden Reserves/ Efficacité énergétique en Russie : des réserves cachées. - Moscow : CENEF, WB, IFC, 2008.
- P. 246. Fig. 3.2.3. : Arnold Paul, Wikipedia. Fig. 3.2.4. : US Federal Emergency Management Agency/ Agence fédérale américaine de gestion des urgences, Wikipedia. Fig. 3.2.5. : V. Dyakov, Wikipedia.
- P. 247. Fig. 3.2.6. : A. Alekperova qui utilise, Global CO_2 emissions from transport by subsector, 2000-2030, IEA/ Émissions mondiales de CO_2 liées aux transports par sous-secteur, 2000-2030, AIE, Paris. https ://www. iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-transport-by-subsector-2000-2030, IEA. Fig. 3.2.7. UK Department for Environment, Food and Rural Affairs/ Ministère britannique de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales.
- P. 248. Fig. 3.2.8. : Wikipedia. Fig. 3.2.9 : ENEA.
- P. 249. Fig. 3.2.10. : https ://lufthansa.myclimate.org/en.
- P. 250. Fig. 3.2.11. : E. Smirnova.
- P. 251. Fig.3.2.12. Wikipedia.
- P. 252. Fig. 3.2.13. : Photo (lgauche) : Wikipedia. Photo (droite) : Floydian, Wikipedia.
- P. 253. Photo (gauche) : Sacramento Seersucker Ride, http ://flickr.com/photos/56052306@ N06/171071869l8. Photo (right) : ehedaya, Wikipedia.
- P. 254. Fig. 3.2.14. : A. Alekperova et Y. Dobrolyubova qui se basent sur des documents tirés de Wikipedia. Fig. 3.2.15. : Wikipedia.
- P. 255. Fig. 3.2.16. : UNDP, 2011.
- P. 256. Fig. 3.2.17. : Wikipedia.
- P. 257. Fig. 3.2.18. : Green Building Council of Finland Conseil du bâtiment durable de Finlande, http ://figbc.fi/en/building-sector/. Photo : avec l'aimable autorisation des auteurs.
- P. 258. Logos : Wikipedia. Photo : A. Hodge, http ://www.usgbc.org/.
- P. 259. Fig. 3.2.19. : gracieusement fournie par E. Gracheva.
- P. 260. Photo (haut) : British Prime Minister's Office/ Bureau du Premier ministre britannique, https ://www.gov.uk. Photo (bas) : www.sidwell.edu.
- P. 261. Photo : http ://www.activehouse.info/cases/home-life.
- P. 262. Photos : Wikipedia.
- P. 263. Photo (haut) : J. Seifert, Wikipedia. Photo (bas) : tiré du film sur Masdar City's 'Sustainable Living, Made Easy' campaign/ Campagne « Une vie durable, en toute simplicité » de Masdar City..
- P. 264. Photo (haut) : US Navy National Museum of Naval Aviation/ Musée national de l'aviation navale de la marine américain. Photo (milieu) : NASA. Photo (bas) : G. Jones, Wikipedia.
- P. 265. Photo : ecstaticist, Wikipedia.
- P. 268. Fig. 3.3.1. : Photo (gauche et centre) : Wikipedia. Photo (droite) : avec l'aimable autorisation des auteurs.
- P. 269. Photos : http ://www.climate-kic.org/, http ://wmsbf.org/, http ://memoenglish.ru/, http ://originalcarbon.com/why-offset/, http ://www. environnet.in.th/
- P. 271. Fig. 3.3.2.-3.3.4. : F. Urban, How we heat the street/ Comment nous chauffons la rue // Real Estate Bulletin, Janvier 18, 2012. http ://www.bn.ru/ articles / 2012/01/18/ 89218.html.
- P. 277. Fig. 3.3.5. Photo : Wikipedia.
- P. 278. Table 3.3.1. : Élaborée par les auteurs basée sur la base des données collectées lors de projets en Russie. Photo : C. Hutchingson, Wikipedia.
- P. 279. Fig. 3.3.6. : A. Alekperova, V. Berdin, Yu. Dobrolyubova, Y. Kalinicheva, A. Kokorin.
- P. 283. Photo (gauche) : Yu. Dobrolyubova. Photo (droitet) : Wikipedia.
- P. 284. Photo : T. Yamanaka – AFP/Getty Images, disponibles à http ://global.britannica.com/event/Kyoto-Protocol.
- P. 285. Photo (haut) : P. Souza, Photo officielle de la Maison Blanche, postée sur Wikipedia. Fig. 3.4.1. : Photo : UN, http ://www.un.org/ sustainabledevelopment.
- P. 286. Logo : http ://www.cop21paris.org/about/cop21.
- P. 288. Fig. 3.4.2. : H.M. Shahidul Islam/iStock.
- P. 289. Fig. 3.4.3. : http ://www.un.org/sustainabledevelop- ment/sustainable-development-goals/.
- P. 291. Fig. 3.4.4. : Sommet des Nations Unies sur l'ambition climatique 2023

Vladimir Berdin, Yulia Dobrolyubova, Ekaterina Gracheva, Pavel Konstantinov,
Natalia Ryzhova, Katia Simeonova, Elena Smirnova, Dmitry Zamolodchikov

MODULE SUR LE CLIMAT

Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique

MANUEL SCOLAIRE

©UNDP, 2024

MODULE SUR LE CLIMAT

Une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique

MANUEL SCOLAIRE

PNUD

www.climate-box.com