



LA BOÎTE CLIMAT

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





LA BOÎTE CLIMAT

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

Manuel scolaire

**Programme des Nations Unies pour le développement
2019**



Les auteurs :

Vladimir Berdin (auteur principal, Sections 1.1.-1.4, 2.6, 2.8 et 3.5)
Ekaterina Gracheva (Sections 3.1, 3.2 et 3.4)
Yulia Dobrolyubova (révision complète, Sections 2.7, 2.9 et 2.10)
D.Sc. Dmitry Zamolodchikov (Section 2.3)
D.Sc. Pavel Konstantinov (Sections 1.1, 2.1, 2.4, 2.5, 2.9)
D.Sc. Natalia Ryzhova (Section 2.2)
D.Sc. Elena Smirnova (révision complète, Sections 3.2, 3.3, 3.4)

Réviseurs pédagogiques :

D.Sc. Elena Smirnova
Lyubov Kolotilina

Coordonnateur du projet :

Yulia Dobrolyubova

Éditeurs linguistiques :

Elena Ermakova
Ben William Hooson

Révision technique :

Terence John Carrington

Traduction en français :

Equipe d'Acolad

Conception et présentation :

Anna Alekperova, RA ILF LLC
Imprimé par RA ILF LLC, Office 1, Building 1, 10 Bolshoi Kondratyevsky Lane, Moscou, 123056

Chefs de projet :

Natalia Olofinskaya, D.Sc.Sergey Tambiev, Antonina Khovanskaya, Elena Surovikina

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 de la Boîte 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 des cartes murales et affiches ; 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 » ; Les enseignants suivants de l'école N9 Pereslavl Zalessky (région de Yaroslavl, Russie) pour leur aide lors de l'élaboration de la trousse à outils de la Boîte Climat: Vera Zabavina, Svetlana Rudneva, Tatiana Gordeyeva, Svetlana Tokar, Galina Vorozhtsova, Olga Volodina, Tatiana Kukushkin, Galina Vasikova, Lyudmila Bubnova.

La Boîte 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, 2019. – 254, [2].

Le manuel scolaire de la Boîte Climat fait partie d'une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique destinée aux élèves du secondaire 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 du Fonds pour l'environnement mondial, du Gouvernement de la Fédération de Russie et de la société Coca-Cola. La Boîte Climat poursuit la série de trousse à outils environnementales destinées aux élèves, composées également du Module sur la Mer Noire et Petit Coffre au Trésor du Baïkal.

CDU 373.3 (5) : 551 583

BBK : 74.26:26.237

K49

ISBN978-5-9902971-2-8

© Programme des Nations Unies pour le développement

Tous droits réservés. Cette publication peut être reproduite à des fins pédagogiques et non commerciales sans le consentement écrit du titulaire du copyright, à condition que la source soit dûment citée.

| À propos du projet de la Boîte Climat

Le changement climatique a été reconnu par les Nations Unies comme l'un des problèmes mondiaux les plus importants 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 que chacun d'entre nous, à des degrés divers, est responsable des changements qui se produisent sur notre planète. Nous consommons des biens et des services dont la production exige des ressources et de l'énergie, à savoir des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel). La production et la consommation de combustibles fossiles provoquent des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui entraîne une augmentation de l'effet de serre et des températures de l'air de la planète. Il s'agit de l'empreinte carbone que nous laissons sur Terre.

Pour limiter notre impact sur l'environnement et réduire notre empreinte carbone, nous devons disposer de connaissances pertinentes. 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 l'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 la Boîte Climat : une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique à destination des étudiants.

La Boîte 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 ;
- 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 XXI^e siècle ;
- une affiche contenant des conseils sur la manière de réduire son empreinte carbone.

La Boîte Climat vise à fournir aux étudiants des informations essentielles sur les problèmes liés au changement climatique mondial de façon intéressante, attrayante et ludique, ainsi que des recommandations destinées aux enseignants quant à l'utilisation de la trousse à outils dans le cadre du programme scolaire.

Une grande équipe de rédacteurs a travaillé à l'élaboration de la Boîte 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.

Il est essentiel que la Boîte Climat ait 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 les 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 la Boîte 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 la Boîte Climat.

La réussite de la phase de pilotage la Boîte 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 2017, le PNUD a entrepris de déployer le projet de la Boîte Climat à plus grande échelle, dans huit pays d'Europe de l'Est, du Caucase et d'Asie centrale, avec l'ambition de répéter ultérieurement cette opération. Des versions numériques de la trousse à outils sont accessibles aux enfants en anglais et en russe sur le site Internet www.climate-box.com et en applications mobiles.

La présente version française de la Boîte Climat, publiée en 2019, contient les informations les plus récentes et intègre les commentaires et recommandations formulés par les enseignants et experts des pays participants.

Nous espérons que la Boîte Climat constituera 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.





Avant-propos

2030, 2050, 2100... Ces années sont souvent mentionnées lorsque nous parlons du changement climatique provoqué par l'homme, de ses effets et de la nécessité de s'adapter aux transformations qui se produiront par la suite. Ces dates semblent lointaines pour la plupart des personnes, mais pas pour vous, car ces points de repère sur l'axe du temps sont essentiels pour la nouvelle génération. 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.

C'est la raison pour laquelle la Boîte 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 bien plus 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. La sensibilité à ces questions doit être développée dès que possible. L'instruction peut prendre diverses formes. La Boîte Climat propose une introduction fraîche et dynamique à ce sujet particulièrement complexe. En reprenant les données scientifiques les plus récentes sous la forme de graphiques simples, de dessins et d'histoires, les élèves peuvent facilement assimiler les connaissances au moyen d'une variété de canaux. Les Exercices contenus dans la Boîte 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. Bien évidemment, 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, la consommation 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 futurs possibles en fonction de nos choix actuels. Le choix nous appartient de vivre dans un monde différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, un monde plus chaud avec des conditions climatiques en mutation, mais constituant encore une demeure à laquelle la plupart des personnes sur Terre seront capables de s'adapter, et d'y vivre confortablement, ou, en conséquence d'un changement climatique incontrôlé, de vivre dans un monde foncièrement différent, bien plus chaud que ce à quoi les hommes ou les écosystèmes seront capables de 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, des phénomènes météorologiques extrêmes causant du tort aux personnes les plus vulnérables, et de nombreux écosystèmes ayant 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.

En partageant nos connaissances de ces conséquences potentiellement fatales grâce à la science et l'instruction, en éveillant davantage les consciences à l'aide de matériel pédagogique comme la Boîte Climat, à tous les niveaux de l'éducation, j'espère que nous inciterons la prochaine génération à ne pas perdre autant de temps que nous ne l'avons fait, et à prendre les bonnes décisions.

Thomas Stocker

Coprésident Groupe de travail du GIEC I 2008–2015

Professeur de Physique

Université de Berne, Suisse

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE 1. Le problème du changement climatique	11
1.1. Climat et temps	12
1.2. Les types de climats et les zones climatiques.	14
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé	24
1.3.1. Les causes du changement climatique : en millions d'années	26
1.3.2. Les causes du changement climatique : en dizaines de milliers d'années	28
1.3.3. Les causes du changement climatique : en siècles	30
1.4. Le changement climatique de nos jours	35
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 ?	47
2.1. Les effets du changement climatique sur... le temps	49
2.2. Les effets du changement climatique sur... les plantes et les animaux	58
2.3. Les effets du changement climatique sur... les forêts	76
2.4. Les effets du changement climatique sur... les ressources en eau	94
2.5. Les effets du changement climatique sur... l'agriculture	103
2.6. Les effets du changement climatique sur... les régions côtières	109
2.7. Les effets du changement climatique sur... les régions montagneuses	119
2.8. Les effets du changement climatique sur... la région arctique	133
2.9. Les effets du changement climatique sur... les villes et la santé	148
2.10. Les effets du changement climatique sur... les problèmes sociaux	158
PARTIE 3. Comment prévenir les changements climatiques dangereux ?	169
3.1. Les énergies « vertes »	170
3.1.1. Qu'est-ce que l'énergie ?	170
3.1.2. Les principales sources d'énergie	171
3.1.3. Les combustibles fossiles	172
3.1.4. L'énergie nucléaire	176
3.1.5. Les énergies renouvelables	178
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	190
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie	196
3.2.1. Transports respectueux de l'environnement	200
3.2.2. Appareils électroménagers et appareils électriques	205
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs	208
3.2.4. Villes vertes	212
3.3. L'empreinte carbone	217
3.4. Comment puis-je aider la planète ? En réduisant votre empreinte carbone	221
3.5. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable	231
PARTIE 4. Directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils de la Boîte Climat dans les établissements scolaires	238
Liste des figures	252



Le problème du changement climatique



partie

1

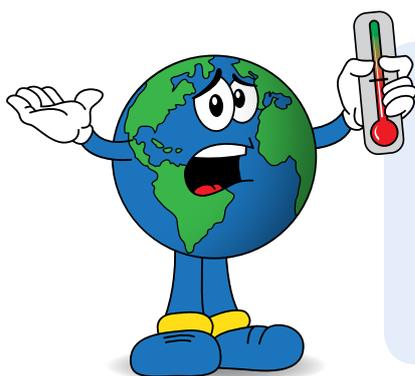
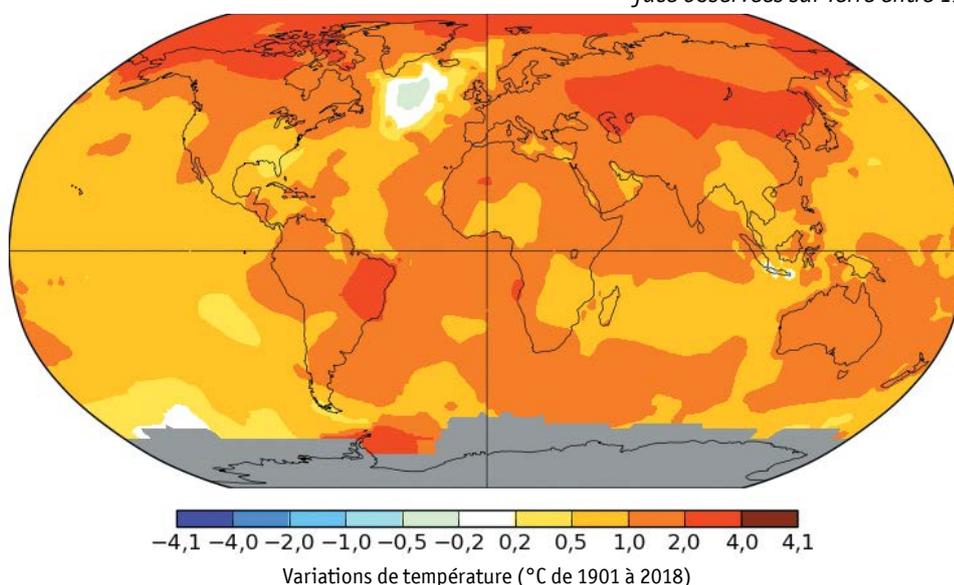
1. Le problème du changement climatique	11
1.1. Climat et temps	12
1.2. Les types de climats et les zones climatiques.	14
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé	24
1.3.1. Les causes du changement climatique : en millions d'années	26
1.3.2. Les causes du changement climatique : en dizaines de milliers d'années	28
1.3.3. Les causes du changement climatique : en siècles	30
1.4. Le changement climatique de nos jours	35

1. | Le problème du changement climatique

Le changement climatique est l'un des problèmes les plus importants de notre époque. Il y a de cela trente ans, seuls les scientifiques parlaient de changement climatique, mais aujourd'hui, celui-ci est évident pour 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 au cours d'un mois donné.

Le fait que le climat de notre planète évolue, et ce rapidement, ne laisse aucun doute. Jugez par vous-même : au cours des 130 dernières années, la température moyenne sur Terre a augmenté d'un degré Celsius. Cela peut paraître peu, 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. Rappelez-vous ceci : la hausse d'un degré Celsius correspond à une moyenne mondiale, mais certaines régions, notamment l'Arctique, se réchauffent de façon plus marquée et bien plus vite.

Fig. 1.1. Carte des variations de la température de surface observées sur Terre entre 1901 et 2018.



La Terre se réchauffe !

La température moyenne sur la Terre a augmenté de 1 °C depuis le début du XXe siècle. Au cours des 18 dernières années, 17 ont figuré parmi les années les plus chaudes depuis que ces données sont consignées, 2016 constituant le record absolu. Dans l'hémisphère Nord, la période comprise entre 1983 et 2018 a été la plus chaude de ces 1 400 dernières années.

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 ce changement est dû à l'impact sur notre planète 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.

Que se passe-t-il réellement au niveau du temps et du climat ? Comment le climat de la Terre a-t-il évolué par le passé et comment évolue-t-il aujourd'hui ? Quels sont les responsables de ces changements ? Que sont les gaz à effet de serre et que pouvons-nous faire pour améliorer les choses ? 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 dans 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 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 », ces choses 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 Mark Twain l'a très bien expliqué : « 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 !

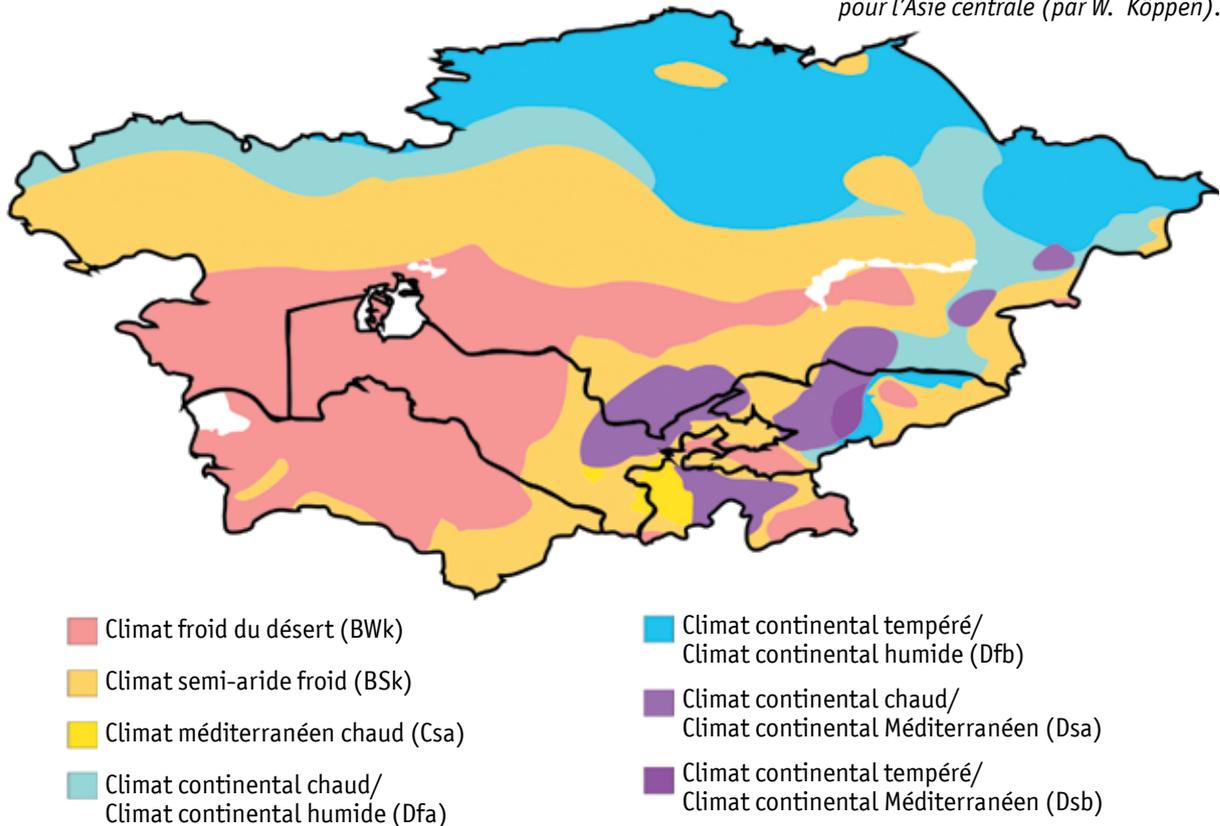


Les principales caractéristiques du climat sont :

- 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.

L'observation, l'étude et la prévision du temps relèvent d'une science particulière, appelée la météorologie. La science permettant d'étudier le climat s'appelle la **climatologie**.

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



Une 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.



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 générée par une colonne d'air.



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

1.2. | Les types de climats et les zones climatiques

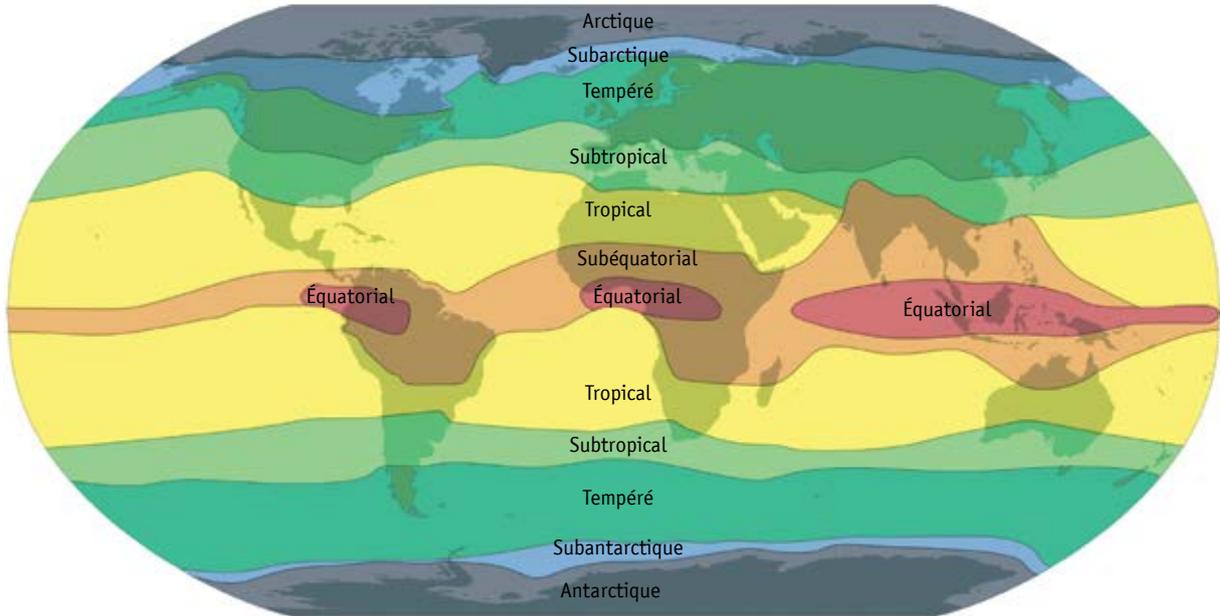
Les différentes parties du globe bénéficient de climats différents. Dans les pays du nord, lorsque les gens regardent par la fenêtre en hiver et voient de la neige partout, ils rêvent de partir en vacances dans des pays tropicaux, où ils pourront profiter du soleil et se baigner dans les eaux chaudes 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 cèdent la place les unes aux autres de l'équateur vers les pôles.

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



Le système de classification des climats le plus connu a été élaboré par un climatologue russe allemand du nom de Wladimir Koppen 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 zones climatiques** sont des zones possédant un climat relativement uniforme.*

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 une ou plusieurs masses d'air typiques de ces zones climatiques.

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 toutes 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	Masses 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
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, au sud-ouest de l'océan Pacifique, 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 à 45 °C, mais redescend la nuit à +10 à 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 l'eau. 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 (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.



Subpolaire (subarctique, subantarctique)

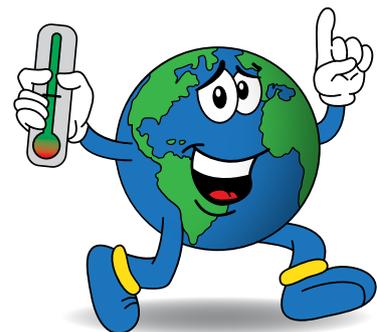
On trouve un climat subarctique entre l'Arctique et les zones tempérées de l'hémisphère Nord. Ce climat se caractérise par des masses d'air à température modérée en été et des masses d'air froid provenant de l'Arctique en hiver. Les étés sont courts et frais, la température de l'air étant rarement supérieure 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'océans. Les précipitations et chutes de neige annuelles dans ces régions s'élèvent à 500 mm.

Climat polaire

Le climat polaire se retrouve au nord du 70e parallèle dans l'hémisphère Nord (climat arctique) et au sud du 65e 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 dans 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 $-93,2^{\circ}\text{C}$ (Figs. 1.2.4 et 1.2.5). 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. La température minimale record internationalement reconnue demeure établie à $-89,2^{\circ}\text{C}$, niveau enregistré à la station de recherche soviétique (désormais russe) de Vostok en Antarctique le 21 juillet 1983 (Fig. 1.2.2).

L'endroit le plus chaud sur notre planète est la Vallée de la mort aux USA, où une température record de $+56,7^{\circ}\text{C}$ à l'ombre a été enregistrée le 13 juillet 2013 (Fig. 1.2.3).

Fig. 1.2.2. Station de recherche russe de Vostok en Antarctique.



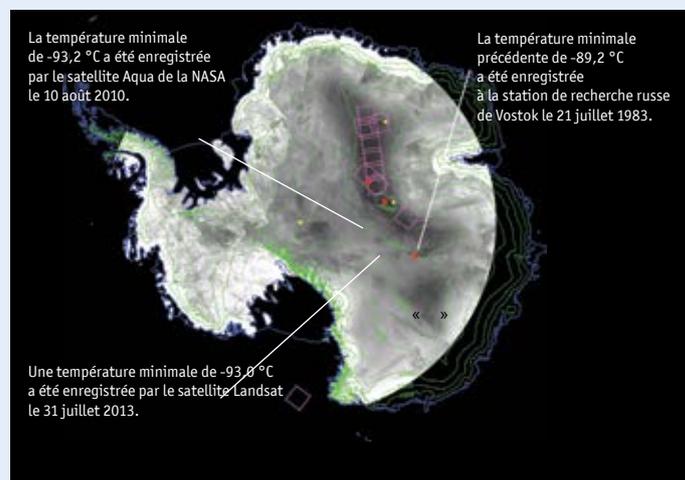
Fig. 1.2.3. Vallée de la Mort, USA.



Fig. 1.2.4. Le satellite américain Aqua a été lancé par la NASA en 2002 afin d'étudier les processus physiques de la Terre.



Fig. 1.2.5. 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.



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 les différences entre chacun ? Dans quels climats prédominent-ils et pourquoi ?
3. Dans quelle zone climatique vivez-vous ? Quel temps fait-il généralement aux 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 ?



Exercices

Exercice 1.

Jeu

Matériel : Cartes mentionnant les différentes caractéristiques des différents types de climats : 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 dont il s'agit.

Exercice 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 ?

Exercice 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.

Exercice 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.



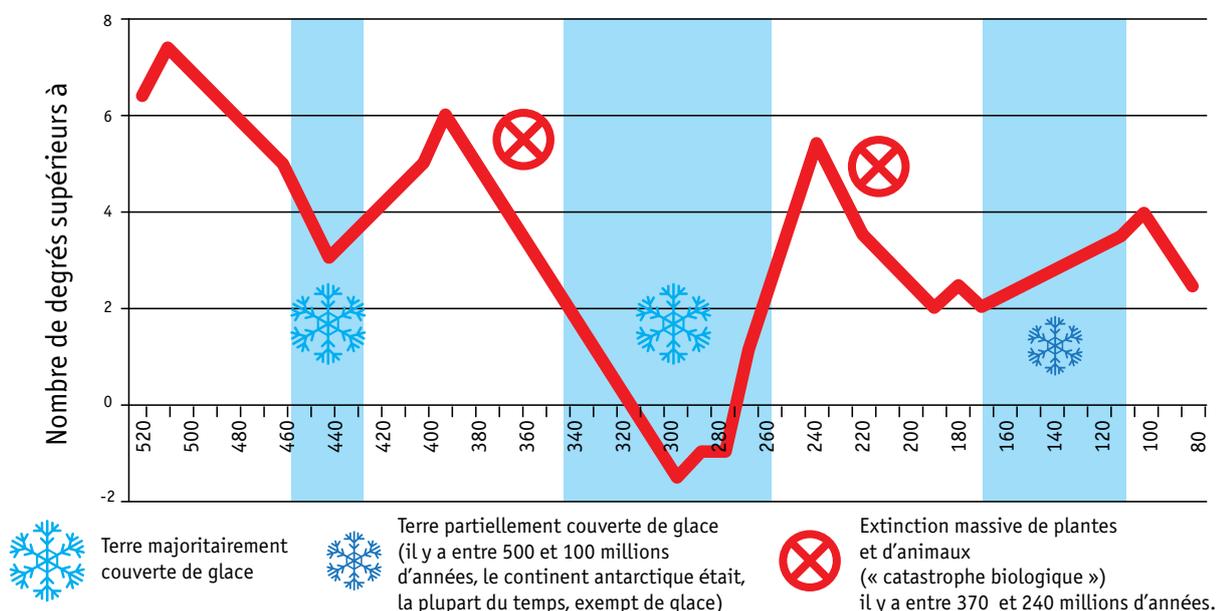
1.3. | Comment et pourquoi le climat a changé par le passé

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 grandement 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 arabe, il y ferait sûrement trop chaud pour pouvoir y vivre !

Fig. 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 passé est appelée **paléo-climatologie**.

Fig. 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.

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 l'eau absorbent presque intégralement le rayonnement solaire et se réchauffent donc.

Fig. 1.3.3. Qu'y a-t-il à l'intérieur de la Terre ?

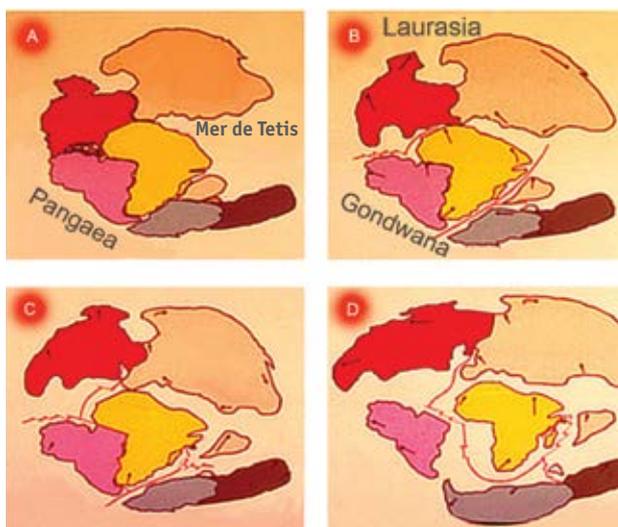
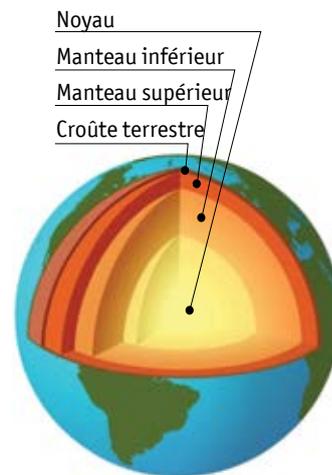


Fig. 1.3.4. Dérive des continents durant les 500 derniers millions d'années.

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

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 l'eau absorbent presque intégralement le rayonnement solaire et se réchauffent donc.

Lors des changements climatiques majeurs, notamment lors 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 incapable 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 éclosent 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 changement 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 apparues 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.

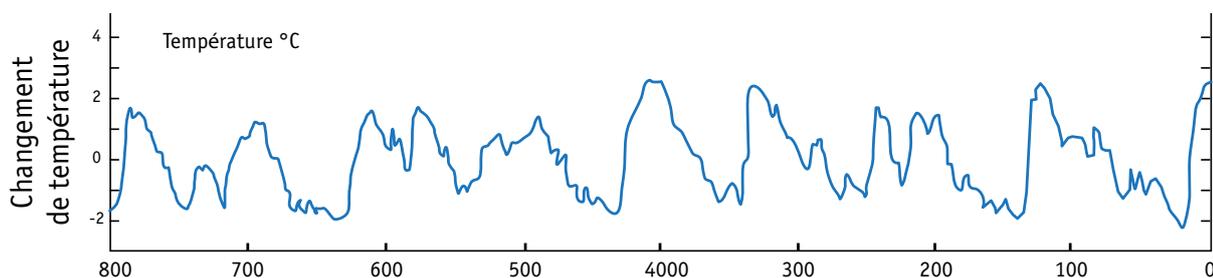


Il y a 100 millions d'années, il faisait bien plus chaud sur Terre qu'aujourd'hui. Il y a 30 ou 40 millions d'années, l'Antarctique s'est retrouvé couvert de glace, phénomène qui s'est reproduit avec le Groenland il y a 10 millions d'années, entraînant une chute des températures à leur niveau actuel.

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

Nous savons que la température sur Terre évolue tous les millions 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.

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

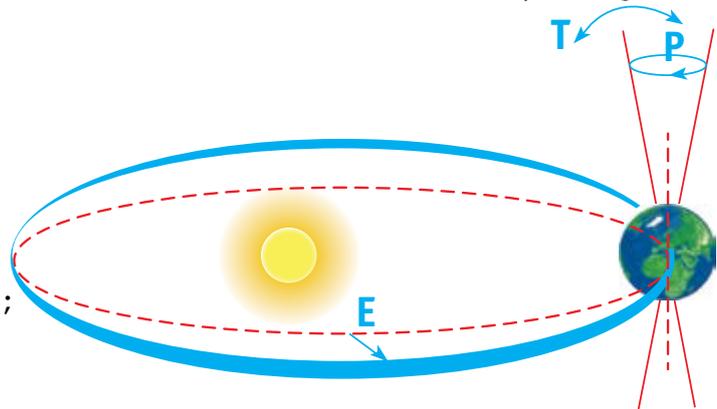


Quelle en est la raison ? Selon les scientifiques, l'alternance de périodes glaciaires et de périodes plus chaudes est d'origine astronomique (Fig. 1.3.6).

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 courte 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.

Fig. 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.



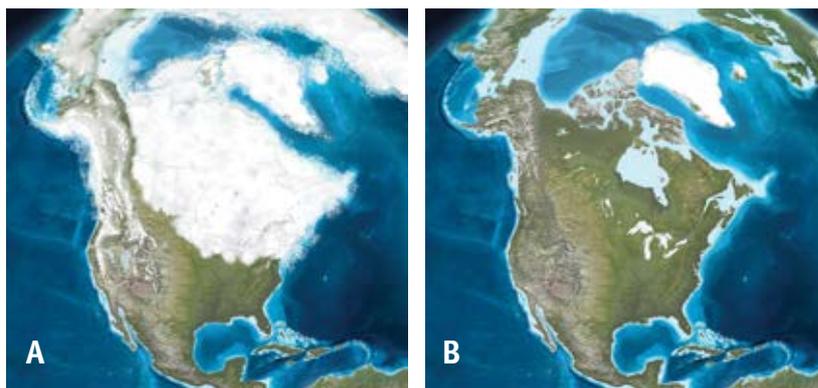
La Terre achève une rotation de son axe avec une périodicité de 19 000 à 23 000 ans. Lorsque vous faites tourner une toupie, sa pointe reste bien droite au début, puis commence à décrire des cercles, et enfin s'arrête de tourner et tombe. La Terre est semblable à une toupie. Il n'y a évidemment aucune 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 ensuite (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.

Fig. 1.3.7. A) L'Amérique du Nord durant 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 permettent 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 varié d'un très notable 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 enregistrements de périodes fertiles (chaudes) et moins fertiles (froides) ayant survécu témoignent de fluctuations climatiques importantes. Les scientifiques peuvent également tirer des conclusions quant 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).

Fig. 1.3.8. Néerlandais faisant du patin à glace sur un canal gelé. Estampes de la série « Fashionable characters » de Romeyn de Hooghe (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 entraînent 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 demandé 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. 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.

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°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.

Fig. 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.



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 blanche vanille ou le noir chocolat ? 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 l'ère glaciaire a-t-elle fait son apparition ?
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

Exercice 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 ?

Exercice 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.

Exercice 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 l'ensemble de 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.

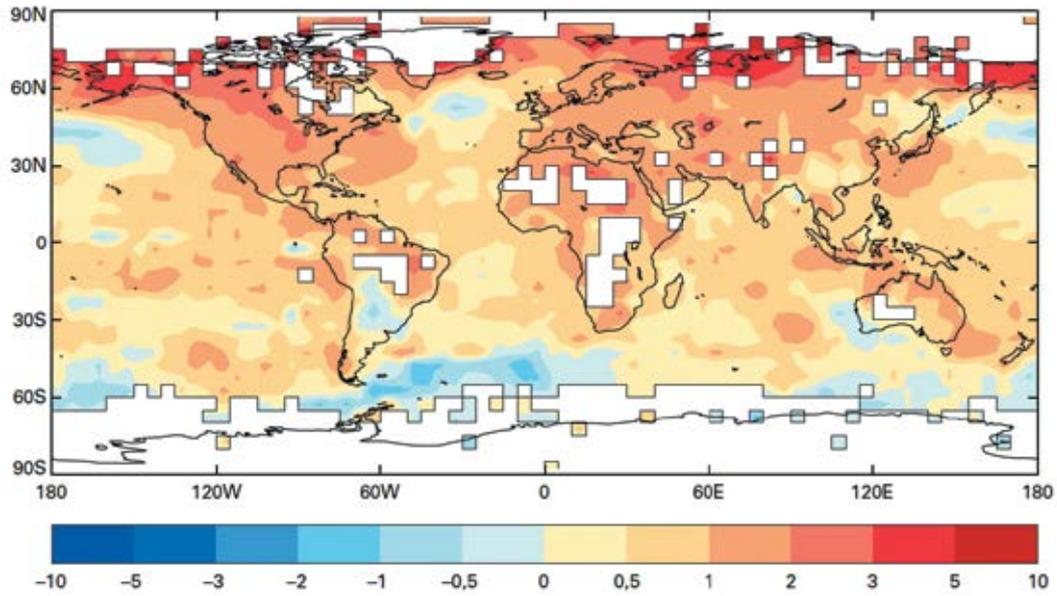
En supposant que l'Antarctique se déplace à une vitesse de 2 cm par an, combien d'années faudrait-il pour qu'un réchauffement de la terre résultant uniquement du mouvement de l'Antarctique soit suffisant pour permettre aux dinosaures de vivre de nouveau sur terre.



1.4. | Le changement climatique de nos jours

Au cours du dernier siècle, la température de la Terre a commencé à augmenter d'une étrange manière. En 100 ans, la planète s'est réchauffée de près d'un degré ! Dans l'hémisphère Nord, la période comprise entre 1983 et 2018 a été la plus chaude de ces 1 400 dernières années (Fig. 1.4.1).

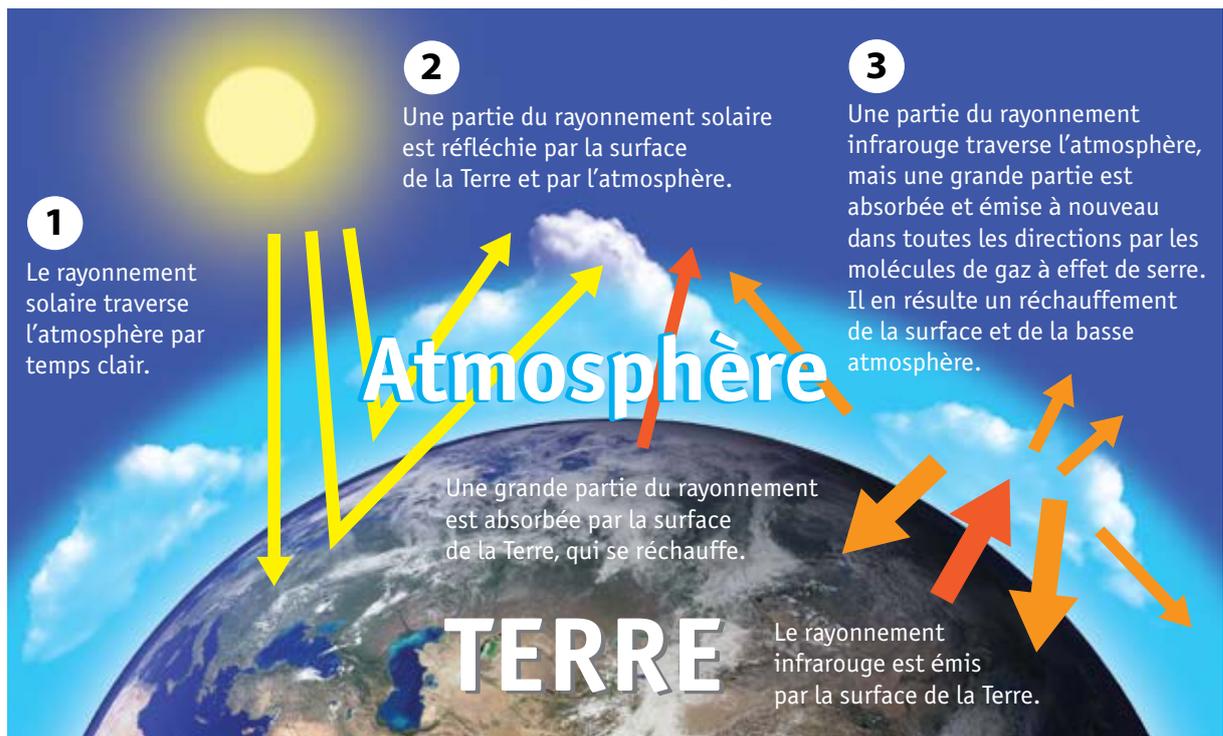
Fig. 1.4.1. La carte indique de combien de degrés la température avait évolué dans les différentes régions du monde en 2018, par rapport à sa valeur moyenne entre 1961 et 1990.



Variation de la température de l'air en 2018 (°C) par rapport à la température moyenne relevée entre 1961 et 1991.

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

Fig. 1.4.2. L'équilibre énergétique de la Terre et l'effet de serre.

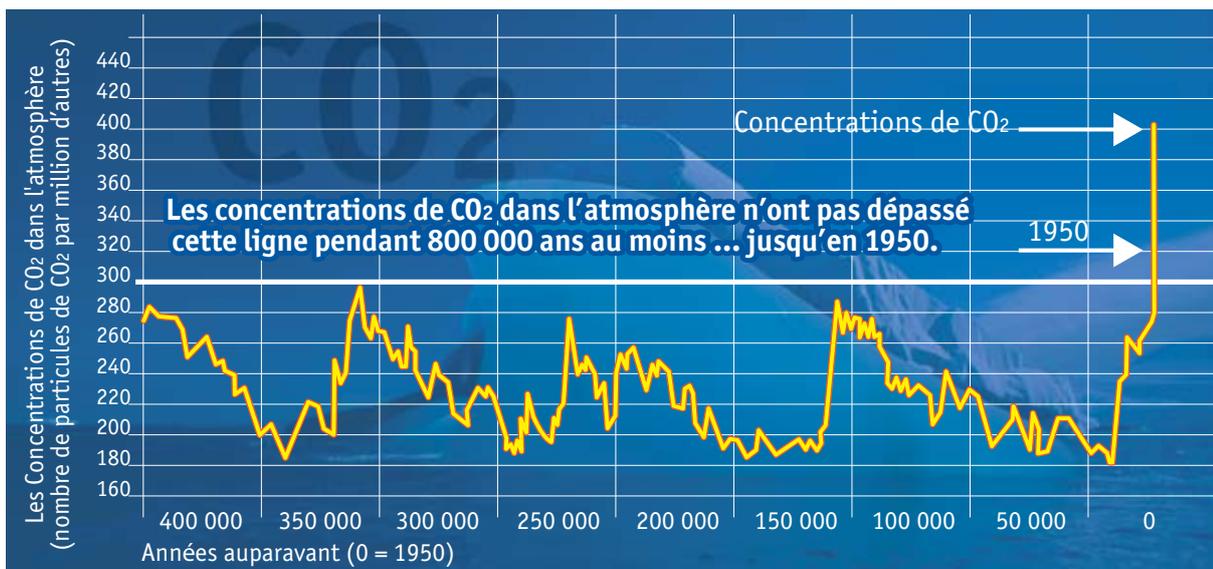


L'effet de serre

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 (pour des raisons de commodité, nous les désignerons par leurs formules chimiques, CO_2 et CH_4) et d'autres, ainsi que la vapeur d'eau. Ils constituent une entrave au 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 $+14^\circ\text{C}$ comme à l'heure actuelle, mais de -19°C . La chaleur de la Terre partirait dans l'espace sans réchauffer l'atmosphère. Cela rendrait difficile toute vie sur notre planète.

Les scientifiques ont depuis longtemps prédit 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 XXe siècle, la prédiction s'est confirmée : la concentration de ces gaz a rapidement commencé à croître à l'échelle mondiale (Fig. 1.4.3).

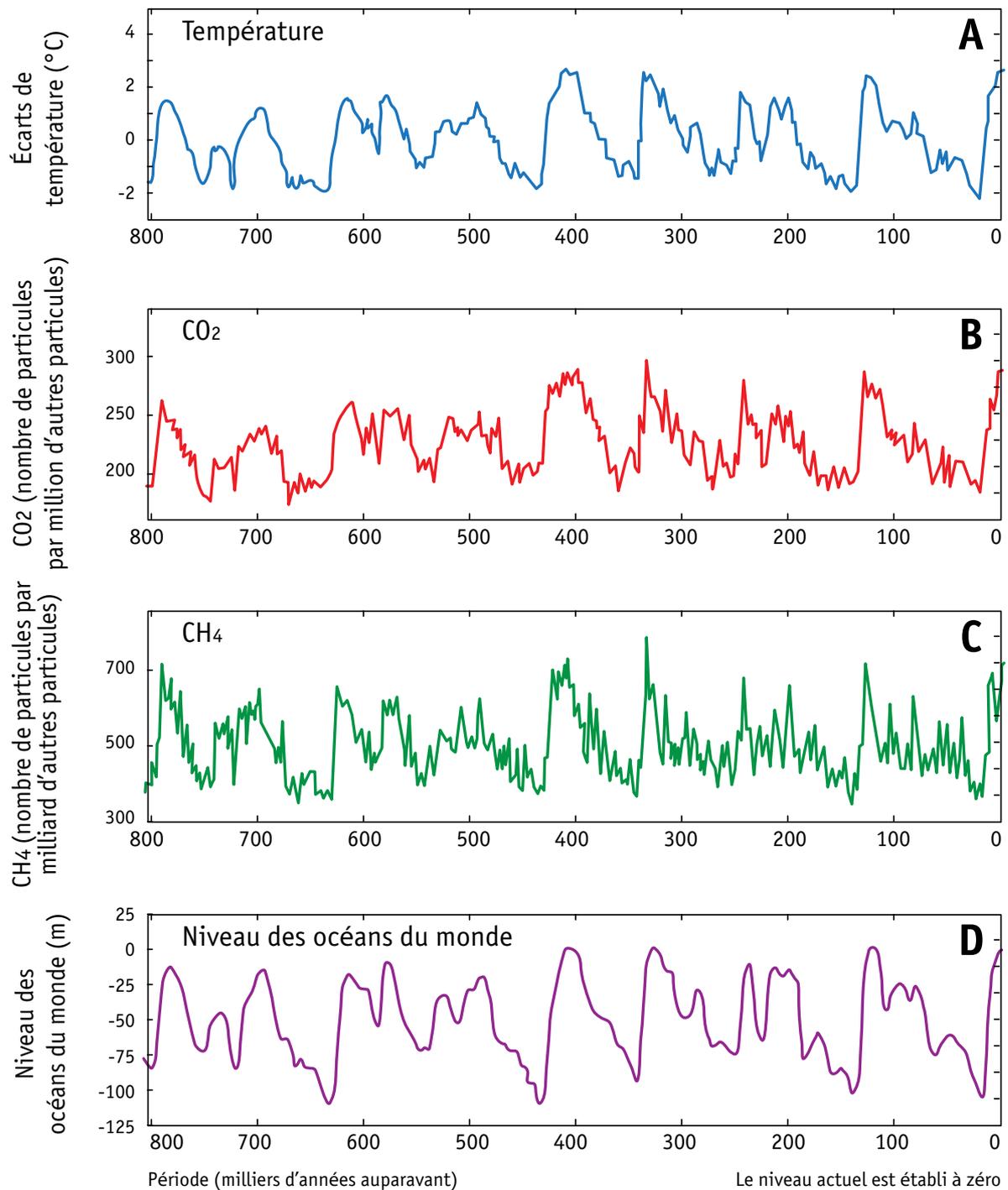
Fig. 1.4.3. Concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère au cours des 400 000 dernières années.



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 d'autres particules. À l'heure actuelle, les concentrations de CO_2 s'élèvent à 400 parties par million ! Depuis le début de la révolution industrielle (dans les années 1750), la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de 40 %, celle du méthane de 120 % et celle du protoxyde d'azote de 20 % ! 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.

Fig. 1.4.4. Variations au cours des 800 000 dernières années par rapport à la moyenne :
A, température de l'air ;
B, concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) ;
C, concentrations de méthane (CH₄) ;
D, niveau des océans.

Calculé selon la teneur isotopique en oxygène de la glace de l'Antarctique.



Le niveau des océans, présenté sur le graphique du bas, a changé en même temps que la température et la concentration de gaz à effet de serre. Durant les périodes froides, le niveau de la mer était de 50 à 100 m plus bas qu'actuellement, et durant les périodes chaudes de ces 100 000 dernières années, celui-ci était 5 à 10 m plus haut.

L'augmentation des concentrations de CO₂ est-elle uniquement due à l'activité humaine ou s'agit-il d'un processus naturel ?

Chaque année, la photosynthèse et la respiration des organismes vivants produisent des quantités de dioxyde de carbone bien plus élevées que les émissions provoquées par l'homme (Fig. 1.4.5). Les éruptions volcaniques et la « respiration » des océans jouent également un rôle... Il a toutefois été démontré, grâce à une analyse isotopique, que la principale cause de l'effet de serre était néanmoins l'activité humaine. Cela a pu être établi car les molécules de dioxyde de carbone formées par la combustion de charbon, de pétrole et de gaz naturel diffèrent des molécules de dioxyde de carbone émises par la respiration des organismes vivants.



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.

Fig. 1.4.5. Le cycle du CO₂ dans la nature.

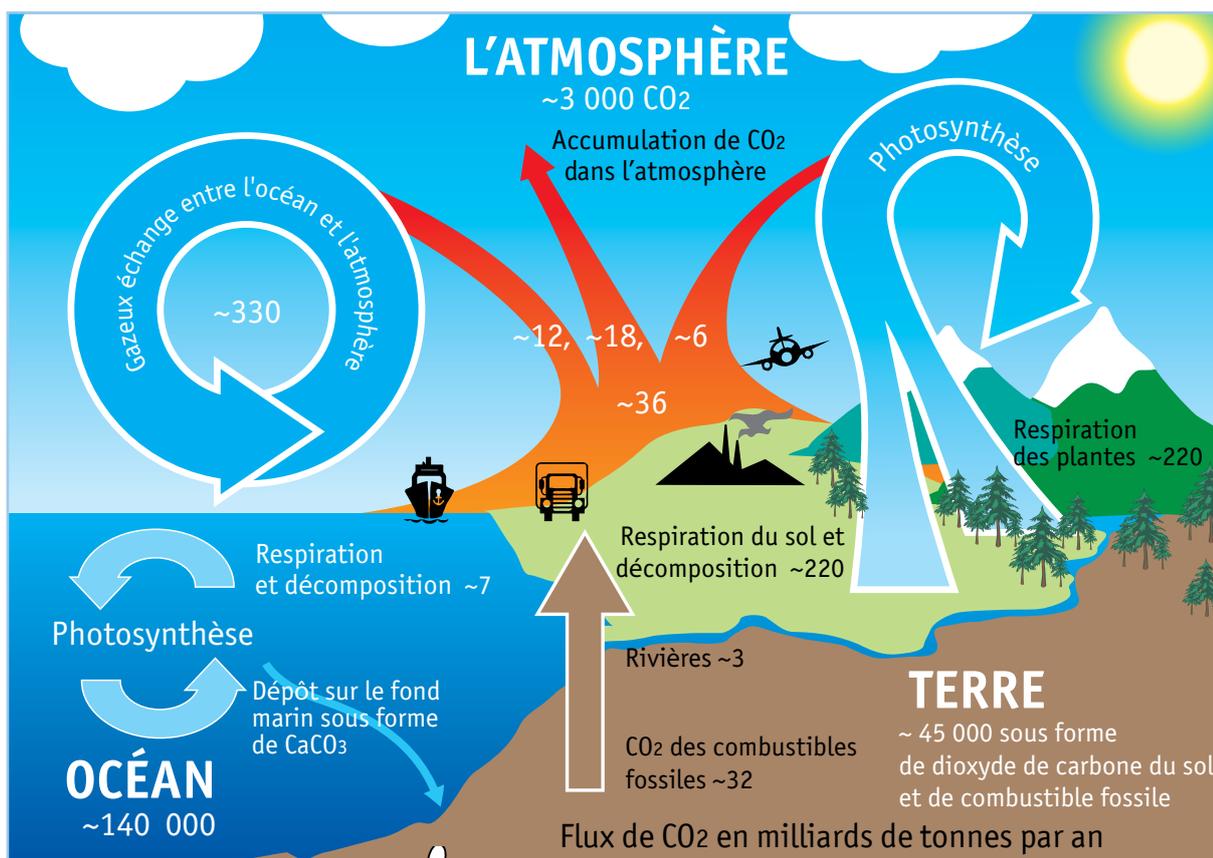
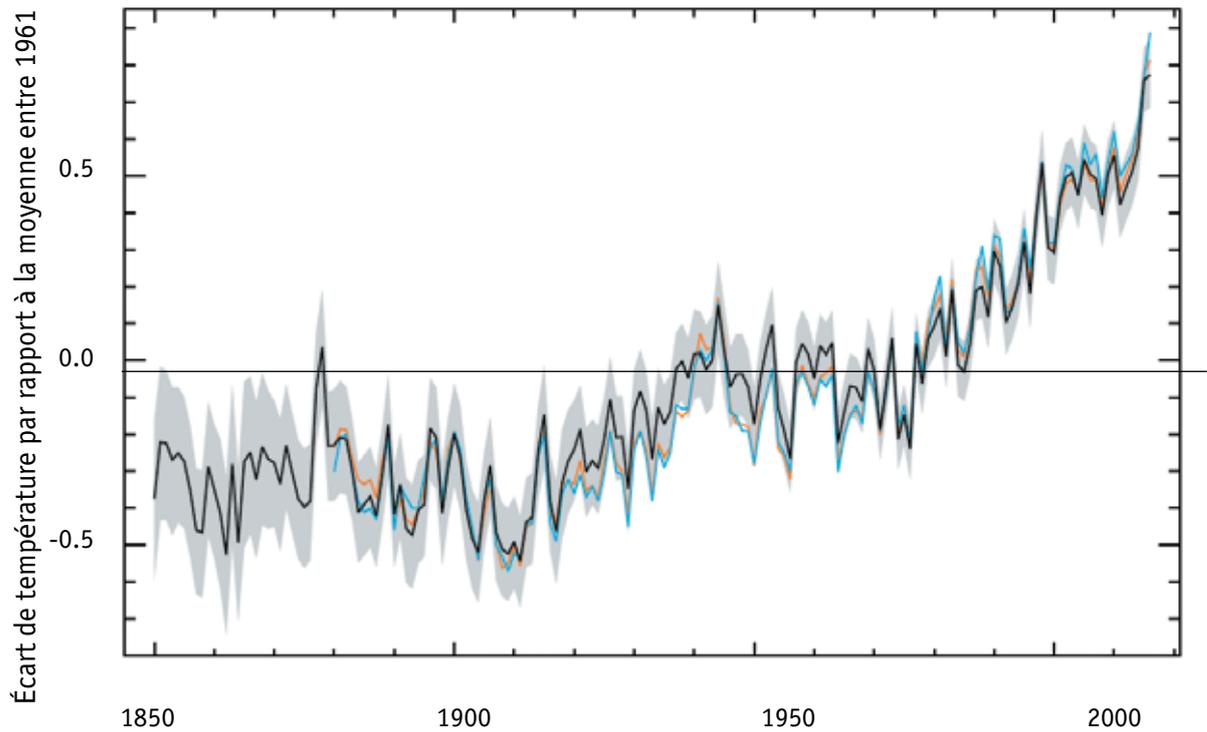


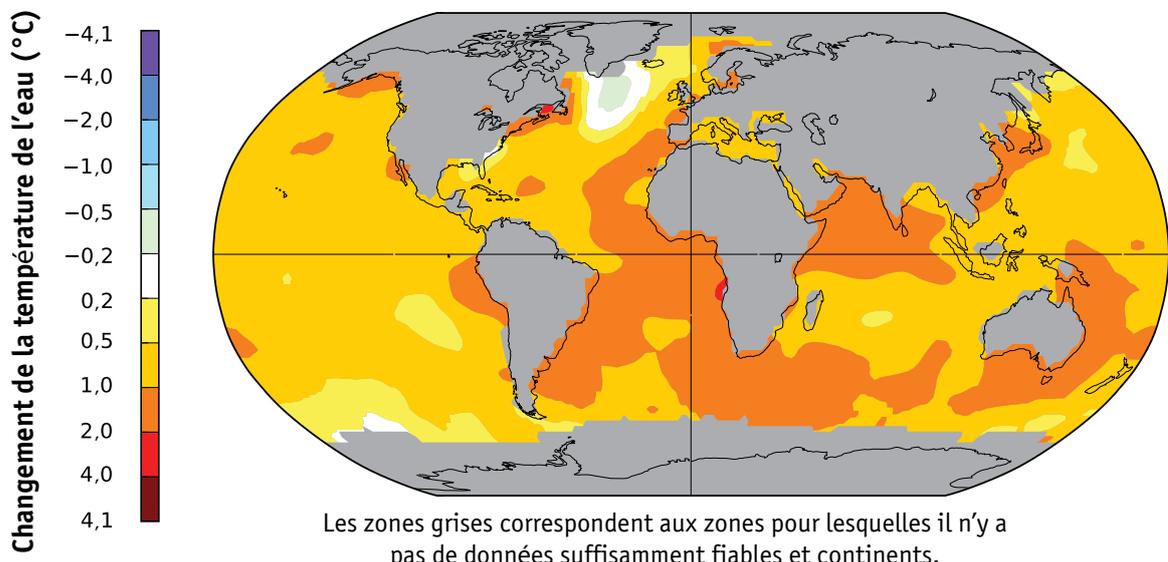
Fig. 1.4.6. Augmentation de la température moyenne sur Terre entre 1850 et 2016.



Les lignes bleu, noir et rouge correspondent à des données émanant de centres météorologiques situés aux États-Unis et au Royaume-Uni. La bande grise représente la marge d'erreur possible, telle qu'estimée par les scientifiques britanniques.

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 CO₂ 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. 1.4.7). Autre point important, l'homme a abattu une grande partie des forêts mondiales, réduisant ainsi leur capacité d'absorption du CO₂ présent dans l'atmosphère, nettement moindre que par le passé.

Fig. 1.4.7. Modification de la température de l'eau dans les océans du monde entre 1901 et 2018.



Les zones grises correspondent aux zones pour lesquelles il n'y a pas de données suffisamment fiables et continents.

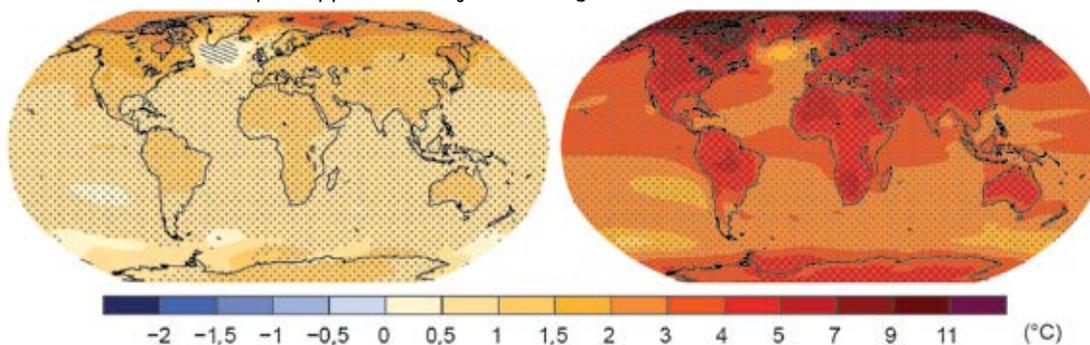
L'océan joue un rôle essentiel dans la détermination du climat de la Terre. Il renferme plus de 90 % de l'énergie du système climatique de la planète. Si la température de l'atmosphère avait augmenté sans que cela ne soit le cas de celle de l'océan, il y aurait moins de raison de s'inquiéter. Cela aurait 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 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 (Fig. 1.4.7).

Outre la modification de la composition gazeuse de l'atmosphère, l'homme pollue l'air avec des aérosols constitués de minuscules particules. La pollution de l'atmosphère résulte également des différentes substances produites par les émissions rejetées par les centrales, les véhicules et les avions, les incendies de forêt et le brûlage de déchets verts. Les particules de l'air obstruent le passage de la lumière du soleil, ce qui augmente la température de l'air près de la surface de la Terre. Lorsqu'elles se déposent sur la neige et la glace, les particules d'aérosol (notamment les particules de suie) réduisent la capacité de la surface à réfléchir les rayons du soleil, ce qui ajoute à l'effet de réchauffement. L'homme est donc responsable à la fois du réchauffement et du refroidissement de la planète, mais l'incidence de ses actions sur le réchauffement climatique (en renforçant l'effet de serre) est trois fois supérieure à l'incidence de l'activité humaine sur le refroidissement. Il y a donc de bonnes raisons de parler de « réchauffement climatique » provoqué par l'homme.

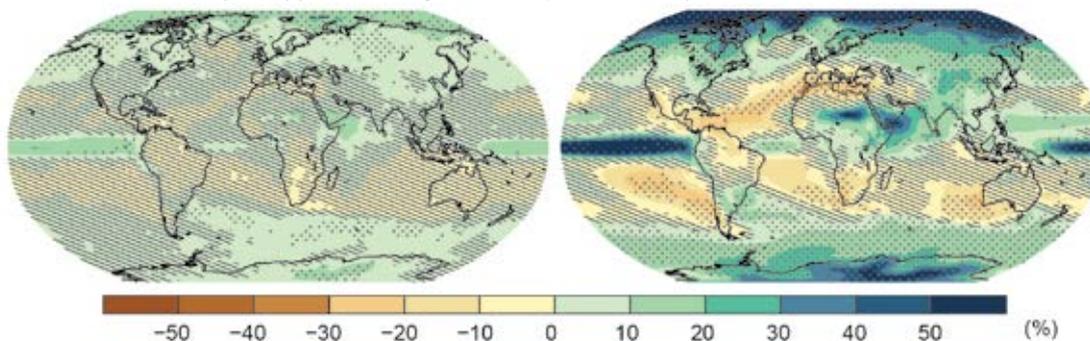
Dès les années 1970, le climatologue Mikhaïl Budyko a fourni des prévisions précises quant au changement climatique et prédit que l'homme rencontrerait des problèmes d'ici les années 2000 sous forme de changements climatiques inhabituels et « étranges ». Il avait raison.

Fig. 1.4.8. Prévisions concernant les changements de température et de précipitations avant la fin du XXI^e siècle selon deux scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre : le scénario le plus favorable (à gauche) et le scénario le moins favorable (à droite).

Variation de la température moyenne de l'air en surface entre 2081 et 2100, par rapport à la moyenne enregistrée entre 1986 et 2005



Variation des précipitations annuelles sur la période 2081-2100, par rapport à la moyenne enregistrée sur la période 1986-2005



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°C, dont 0,75°C au cours de ces 50 dernières années (Fig. 1.4.6). 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. Le changement est bien plus marqué dans certains endroits du globe. La température de l'air a augmenté en Russie de 1,5°C, tandis que dans le Grand Nord, en Arctique, celle-ci a augmenté de 2 à 3°C (Fig. 1.4.1).

Dans certaines parties de la Russie, 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 XXe 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 :

« L'automne fut 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.

Fig. 1.4.9. « Tatiana assise sur le lit. Hiver ». Illustration d'« Eugène Onéguine » par D. Belyukin (Russie, 1999)



Le XIXe 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 XXIe 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 présent siècle. Dans le meilleur des cas, les changements seront relativement modestes (1,5 à 2°C) par rapport au début du XXe siècle. Dans le pire des cas, le climat terrestre pourrait se réchauffer de 5°C. L'Europe du Nord se réchauffera plus rapidement, et la hausse des températures dans la région Arctique pourrait être de l'ordre de 10°C ! 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 XXIe siècle dépendra en grande partie de l'activité humaine.

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.

La plupart des scientifiques s'accordent donc à dire que l'homme est probablement le principal responsable du changement climatique auquel nous assistons sur Terre depuis les 60 dernières années (depuis la moitié du XXe siècle) et qui se poursuivra au cours du siècle à venir.

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 CO₂ 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 est nécessaire de réorganiser l'ensemble de l'économie mondiale, afin de la rendre plus « verte », de sorte qu'elle puisse bénéficier à la fois aux populations et au climat.



Questions

1. L'effet de serre existait-il auparavant ?
Comment a-t-il vu le jour ?
2. Pourquoi la température sur Terre a-t-elle autant augmenté ces 100 dernières années ?
3. La hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère est-elle due à des causes naturelles ou à l'activité humaine ?
Comment cela a-t-il été démontré ?
4. Pourquoi pouvons-nous dire 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 50 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.



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

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



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 ?	47
2.1. Les effets du changement climatique sur... le temps	49
2.2. Les effets du changement climatique sur... les plantes et les animaux	58
2.3. Les effets du changement climatique sur... les forêts	76
2.4. Les effets du changement climatique sur... les ressources en eau	94
2.5. Les effets du changement climatique sur... l'agriculture	103
2.6. Les effets du changement climatique sur... les régions côtières	109
2.7. Les effets du changement climatique sur... les régions montagneuses	119
2.8. Les effets du changement climatique sur... la région arctique	133
2.9. Les effets du changement climatique sur... les villes et la santé	148
2.10. Les effets du changement climatique sur... les problèmes sociaux	158

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'infinime 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 drastiques. Ils entraînent également des conséquences économiques dommageables, et représentent une menace pour la santé et même la vie humaine.



Les conclusions récemment publiées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) – le groupe de climatologues et scientifiques qui fait autorité au niveau mondial – indiquent que le changement climatique en cours pourrait avoir de dangereuses conséquences pour l'homme et pour le milieu naturel dans le futur.

Afin de réduire les dommages occasionnés par le changement climatique, l'humanité doit prendre des mesures appropriées – les fameuses « mesures d'adaptation » – et ce en temps opportun.



L'adaptation implique la modification des systèmes d'origine naturelle ou humaine afin de prendre en compte l'impact réel ou prévisible du changement climatique, de manière à pouvoir en modérer les effets néfastes ou tirer avantage des bénéfiques apportés par le changement climatique. À titre d'exemple, les mesures d'adaptation pourraient comprendre la construction d'immeubles plus résistants aux phénomènes météorologiques extrêmes, la construction de barrages pour lutter contre les inondations, le développement de nouvelles variétés de cultures résistantes à la sécheresse, etc.

2.1. | Les effets du changement climatique 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 chutes de neige en Égypte pour la première fois en 122 ans. 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 !

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



Grave tempête de poussière au Moyen-Orient en septembre 2015

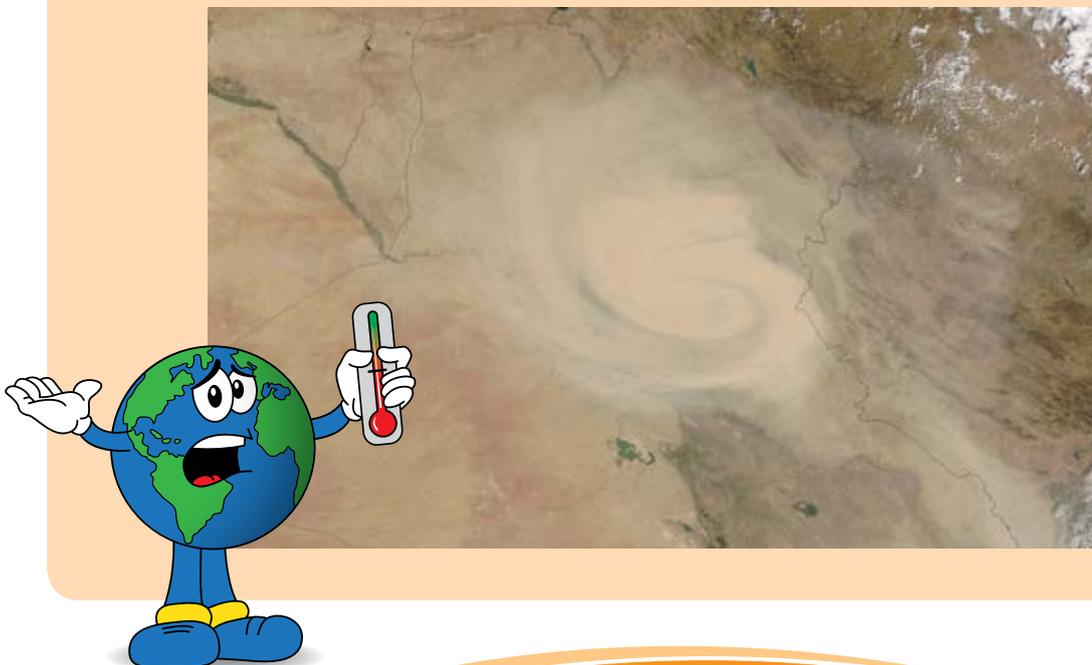
Les tempêtes de poussière ou de sable se produisent plus fréquemment dans les déserts et les régions où le sol est sec. Au Moyen-Orient et dans les autres régions arides, ils peuvent se présenter sous deux formes. Les « haboobs » (mot arabe signifiant « vent violent ») proviennent des fronts de tempêtes 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 »).

Début septembre 2015, une grave tempête de poussière présentant les caractéristiques à la fois du shamal et du haboob a frappé l'Irak, l'Iran ainsi que d'autres pays du golfe Persique et de la Méditerranée orientale. Les dépêches d'actualités ont fait mention de rafales de vent allant jusqu'à 80 km/heure. Des fermetures de routes ainsi que des annulations de vols ont également été rapportées. 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.

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 surpâturages et d'une destruction de la croûte biologique, ainsi que de la hausse des températures locales et mondiales et des sécheresses.

Fig. 2.1.2. Image satellite de la tempête de poussière sur l'Irak, septembre 2015.



Météo instable

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, entraînant 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 nous nous y attendions, 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 un risque plus élevé de sécheresses et de pénuries d'eau douce.

Il est cependant important de se rappeler que des conditions météorologiques inhabituelles ne sont pas forcément synonymes de changement climatique. À titre d'exemple, un hiver particulièrement rigoureux ne signifie pas nécessairement que le climat s'est refroidi. Les données doivent être recueillies sur une longue période (environ dix ans ou plus) avant que l'on puisse parler de changement climatique.

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

Phénomènes météorologiques extrêmes au cours de ces dernières années

USA, 2005

Europe, 2003

Extrême-Orient russe, 2013

Brésil, 2005

Moyen-Orient, 2013

Vague de chaleur en Europe, 2003. En 2003, la France, l'Italie, l'Allemagne, l'Espagne et un certain nombre d'autres pays européens ont été frappés par une vague de chaleur considérée comme la plus forte enregistrée à l'époque, laquelle a débuté en juin et s'est poursuivie jusqu'à la mi-août. Dans le nord de la France, les températures de jour ont été supérieures à 40°C pendant une semaine au moins. Les spécialistes de l'Institut de la Terre de l'Université de Columbia (USA) ont estimé que cette intense chaleur avait coûté la vie à plus de 50 000 personnes en Europe. L'Institut national de la santé et de la recherche médicale français a indiqué que le taux de mortalité en France au cours de l'été 2003 était 60 % plus élevé que celui des précédentes années. Les conséquences désastreuses de cette vague de chaleur exceptionnelle de 2003 ont incité le Ministère de la santé français à élaborer un plan d'action spécial pour déterminer et contrer les incidences majeures des événements climatiques sur la santé. Des plans similaires ont été ultérieurement élaborés dans d'autres pays de l'Union européenne.

Fig. 2.1.3. Vague de chaleur en Europe, 2003. La couleur rouge indique les zones où la température moyenne en juillet 2003 était nettement supérieure à la température moyenne en 2001.



Sécheresse au Brésil, 2005. Le bassin de l'Amazonie a été touché par la sécheresse la plus grave recensée depuis un siècle. Les rivières se sont asséchées à un point tel que les gens pouvaient se déplacer à pied et en vélo là où les canoës et les bateaux étaient habituellement le seul moyen de transport.

Ouragan Katrina aux USA, 2005. L'ouragan Katrina a été l'une des catastrophes naturelles les plus graves de l'histoire des États-Unis. Des barrages se sont écroulés, ce qui a donné lieu au déversement de trombes d'eau ayant laissé la superbe ville de La Nouvelle-Orléans en ruines. 90 % des résidents du sud-est de la Louisiane ont dû être évacués. Ces dernières années, les ouragans et les typhons ont commencé à toucher des régions qui n'étaient auparavant pas menacées par de tels phénomènes.

Inondation dans l'Extrême-Orient russe, 2013. La fin de l'été et le début de l'automne 2013 ont été marqués par des précipitations anormalement élevées dans l'Extrême-Orient russe. Les précipitations se sont concentrées sur le bassin du fleuve Amour. Elles ont duré près de deux mois, entraînant une crue exceptionnelle du fleuve. Début août, il était tombé autant, voire plus, de pluie dans la région de l'Amour que sur l'ensemble de l'année. À certains endroits, le niveau du fleuve est monté de 9 mètres ! Près de cent cinquante villages situés sur le fleuve Amour ont été inondés, et 20 000 personnes ont dû quitter leurs foyers inondés pour s'installer dans des camps provisoires ou chez des proches.

Vague de froid au Moyen-Orient, 2013. Une vague de froid exceptionnelle a paralysé le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord en décembre 2013, entraînant des décès. Les chutes de neige ont poussé les établissements scolaires et bancaires à fermer, des centaines de vols ont été retardés, et les habitants ont reçu la recommandation de ne pas sortir de chez eux.

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 de 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 XXI^e 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 ?

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). Faire preuve de prudence est plus complexe : nous devons adopter des comportements plus prudents, modifier nos habitudes ; par exemple, nous devons apprendre comment 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 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 grande ville ou une petite ville ? 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 ?



Exercice

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



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

Qu'est-ce que la 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 principaux types de biodiversité** :

- la génétique (entre organismes de la même espèce) ;
- les espèces (entre tous les êtres vivants de la planète) ;
- les paysages ou les écosystèmes (entre toutes les combinaisons d'environnements où vivent les organismes).

Qu'est-ce que la **diversité génétique** ? Prenons un exemple : pour nous, toutes les oies d'un troupeau d'oies sauvages sont les mêmes. Mais en réalité, elles sont légèrement différentes les unes des autres. Souvenez-vous, dans l'histoire passionnante du Merveilleux voyage de Nils au pays des oies sauvages, comme chaque oiseau se comportait différemment. Bien sûr, ce n'est qu'une histoire, mais elle est en partie vraie. L'une des oies est plus vive que les autres lorsqu'il s'agit de détecter la présence d'un renard s'avançant sur la glace vers le troupeau endormi ; une autre se souvient où trouver une clairière offrant une abondance de verdure à côté d'un lac ; et une troisième est plus douée que les autres pour trouver son chemin parmi les étoiles. L'ensemble du troupeau bénéficie donc des aptitudes particulières des individus qui le composent. Et cela ne vaut pas que pour les oies sauvages. Chaque espèce d'animal ou de plante doit pouvoir effectuer différentes tâches pour survivre, et elle y parviendra mieux si tel ou tel animal a des aptitudes particulières différentes plutôt que s'ils ont tous exactement les mêmes, comme les robots construits sur la même chaîne de montage.

« Le Merveilleux Voyage de Nils Holgersson à travers la Suède » de Selma Lagerlöf.



La diversité génétique a donné naissance à de nouvelles espèces. Selon les biologistes, les différences de comportement et d'apparence, entre deux ours par exemple, peuvent s'accroître au fil des générations. Et après de nombreuses années, les arrière-arrière-arrière-petits-enfants de ces ours s'installeront dans des régions différentes, commenceront à chasser de manière différente et se prépareront autrement à l'hibernation (ou abandonneront même l'hibernation). C'est ainsi que deux espèces différentes peuvent apparaître – dans le présent cas, 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 ?

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 savane africaine et ses habitants.



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 dépasser toute 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.



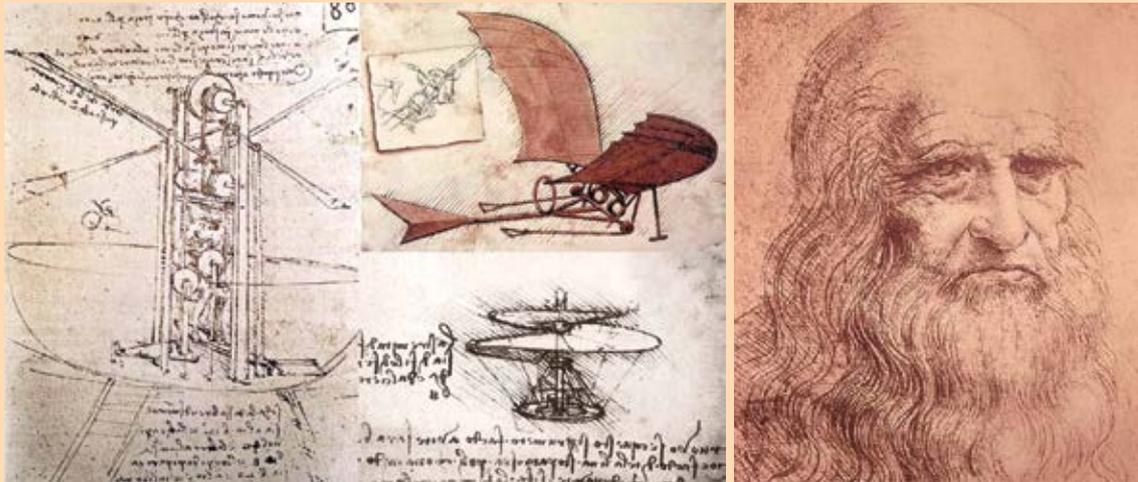
Pourquoi la biodiversité est-elle si importante ?

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 nous. 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'accroissait, 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 imaginer 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 endommagerait 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, du large 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, etc. 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 sont 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 déjà abordé ce sujet dans les sections précédentes). La dérive des continents a entièrement modifié 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 changé le climat terrestre. Après les ères précédentes marquées par le refroidissement de la planète, est venu le temps du réchauffement climatique. 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 entraîné, 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 proches en forme d'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 réapparaît progressivement, mais jamais sous sa forme antérieure ! Des millions d'années sont nécessaires pour que cette réapparition prenne forme, et les espèces éteintes ne réapparaîtront 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, s'adaptent plus rapidement aux changements climatiques. Bien sûr, les organismes de grande taille s'adaptent 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 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 montagnes slovaques, les biologistes ont relevé deux tendances opposées dans les cycles de vie de la *dendroctone de l'épicéa* et de *l'arpenreuse 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.



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.



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 vivent et meurent là où ils sont nés.

Récif corallien.



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. La fumée émanant des graves incendies de forêt et de tourbe en Indonésie donne souvent lieu à des rejets atmosphériques de composés de fer, ce qui entraîne la prolifération rapide d'algues produisant des substances toxiques pour les coraux.

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.

Salpes.



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, la forêt progresse doucement mais sûrement vers la toundra, à un rythme de dix kilomètres par siècle, à mesure que le climat se réchauffe. Cela entraîne 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.

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 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*. *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

Ours polaires.



Renne.



Lemming.



Herbe du cheveu antarctique.



Lièvre de Tolai.



cachez 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. 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.

Manul.



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 comme des enfants, qui peuvent ainsi en apprendre davantage sur les problèmes environnementaux mondiaux. Les parcs nationaux peuvent abriter des nurseries pour la reproduction d'espèces végétales ou animales rares, qui peuvent ensuite être déplacées dans des zones situées en dehors du parc.

Le changement climatique affecte-t-il les parcs nationaux ? Malheureusement, le changement climatique mondial entraîne 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 km², soit plus grande que la Suisse.



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** a récemment installé le premier système écologique d'approvisionnement en énergie à être utilisé au sein d'une zone naturelle protégée en Russie. 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 Sochi 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 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. Elles sont protégées par l'interdiction de mener certaines activités humaines susceptibles de porter atteinte à leur intégrité.

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 économes 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 de 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. Le nombre d'écotouristes augmente d'année en année !

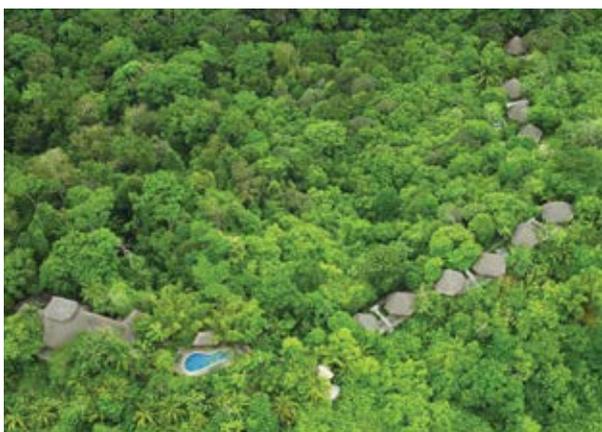


L'écotourisme offre aux gens l'opportunité de voir l'environnement dans un état naturel et préservé, de comprendre à quel point celui-ci est diversifié et vulnérable à l'activité humaine, et de se poser la question suivante : « Que puis-je faire pour la planète ? » Les écotouristes observent les lois 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 que 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.



Écotourisme et changement climatique

La relation entre le changement climatique et l'écotourisme n'est pas évidente au premier abord. Mais il existe une relation étroite, et de nombreuses agences de voyages y prêtent désormais une attention particulière. Que signifie le terme voyager ? Avant toute chose, cela signifie se déplacer d'un lieu à un autre par avion ou paquebot, en train, en voiture ou en bus. Tous ces modes de transport fonctionnent au carburant et polluent donc l'environnement. Les meilleurs moyens de transport en matière d'écotourisme sont le vélo, la marche, le cheval et le rafting. Il est tout à fait possible de construire son itinéraire de manière à réduire au minimum le nombre de trajets en véhicule, et de choisir à la place des moyens de transport plus respectueux de l'environnement. Cela contribue à réduire les rejets de gaz à effet de serre et de substances dangereuses dans l'atmosphère.

Certaines personnes, qui en ont assez du bruit, des bouchons et autres nuisances de la vie urbaine, font plus que de l'écotourisme : elles déménagent de façon définitive à la campagne, où elles apprennent à cultiver des fruits et des légumes locaux et à consommer des produits alimentaires issus d'une production respectueuse de l'environnement. En règle générale, les propriétaires de ces mini-fermes utilisent des sources d'énergie alternatives, refusent d'utiliser des engrais chimiques et pesticides, et fabriquent leur propre compost à partir de déchets organiques. Ces fermes écologiques existent dans de nombreux pays, mais sont particulièrement populaires dans les zones rurales d'Europe, d'Australie, de Nouvelle-Zélande, des USA et du Canada.

Qu'est-ce que le Livre rouge et à quoi sert-il ?

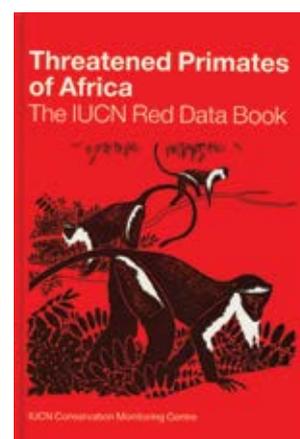
Le Livre rouge est une liste des espèces rares et menacées d'animaux, de plantes et de champignons. La couleur rouge vise à nous rappeler le risque auquel ces espèces sont exposées et l'urgence nécessaire de les protéger et de les préserver.

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 ajoutés. 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 eurasiens).

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.



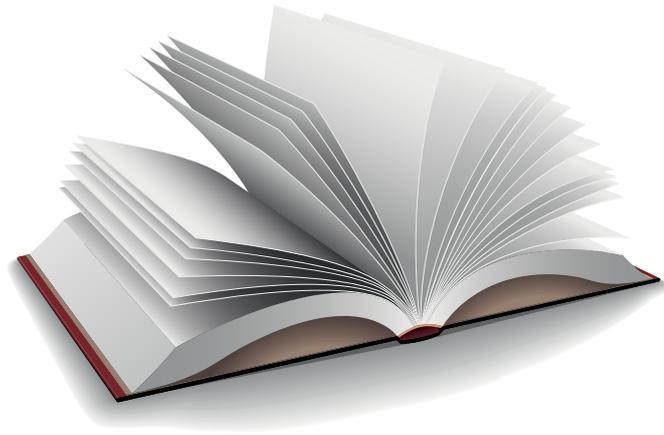
Questions

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. Qu'est-ce que le Livre rouge ? 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 ? Que signifient les différentes couleurs utilisées ?
Pourquoi le Livre rouge s'étoffe-t-il de plus en plus à chaque mise à jour ?
5. Comment le réchauffement climatique affecte-t-il les rennes ?
6. 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 ?

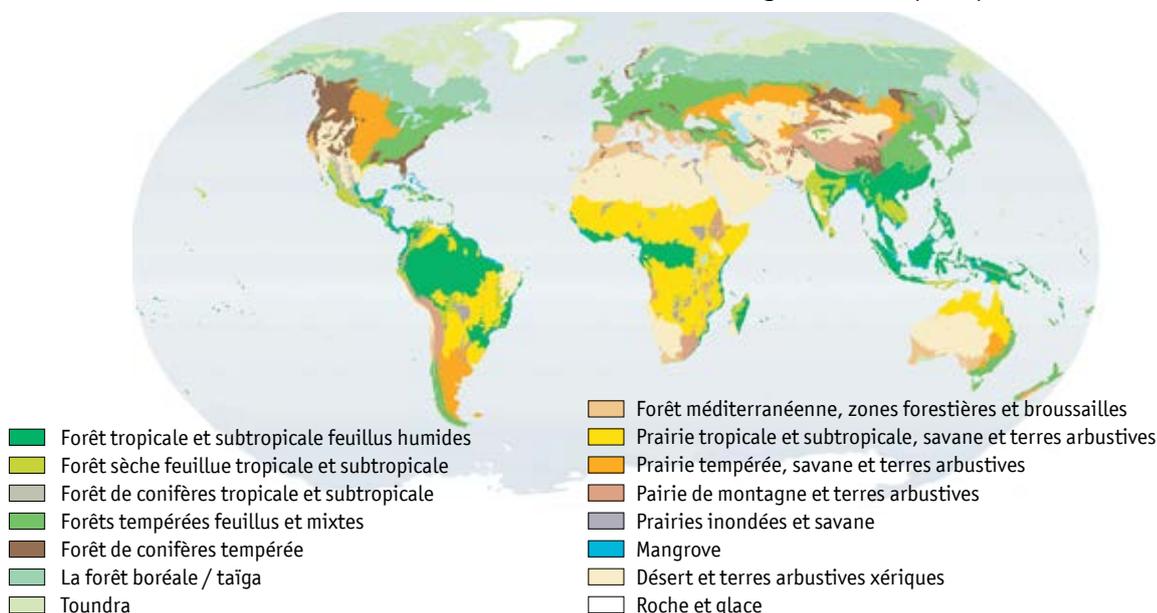
Bien que le terme « forêt » soit couramment utilisé, il n'est pas facile de clairement définir de quoi il s'agit. Il existe plus de 800 définitions différentes du mot « forêt » dans le monde ! Néanmoins, l'approche la plus reconnue pour identifier une forêt, également utilisée par l'Organisation des 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 de feuillus.
- 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 de feuillus, des forêts sèches de feuillus et des forêts de conifères.

Fig. 2.3.1. Les principaux biomes du 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.

Fig. 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.

Fig. 2.3.3. Taïga du sud.



Fig. 2.3.4. Forêt de feuillus.

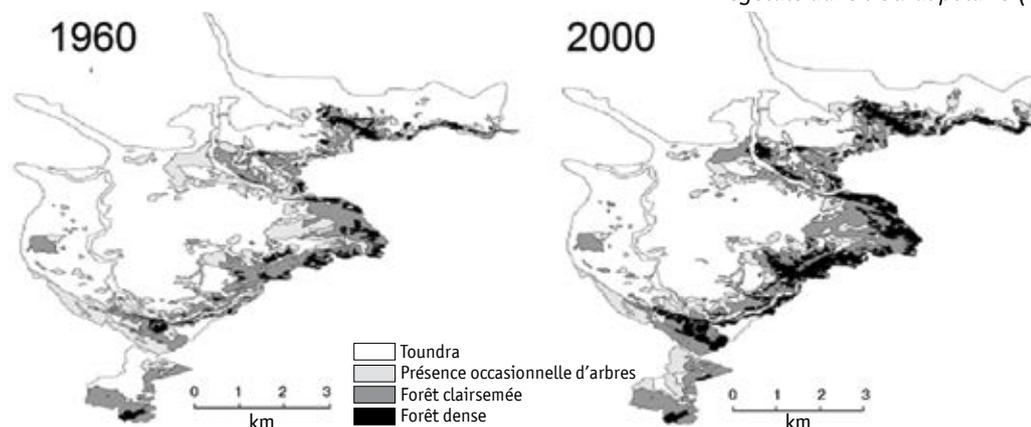


Le changement climatique qui se produit à l'heure actuelle a-t-il un impact sur les forêts ?

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.

Fig. 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 grimper 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 s'éteindre d'ici 2100, si la température planétaire augmente de 4°C.

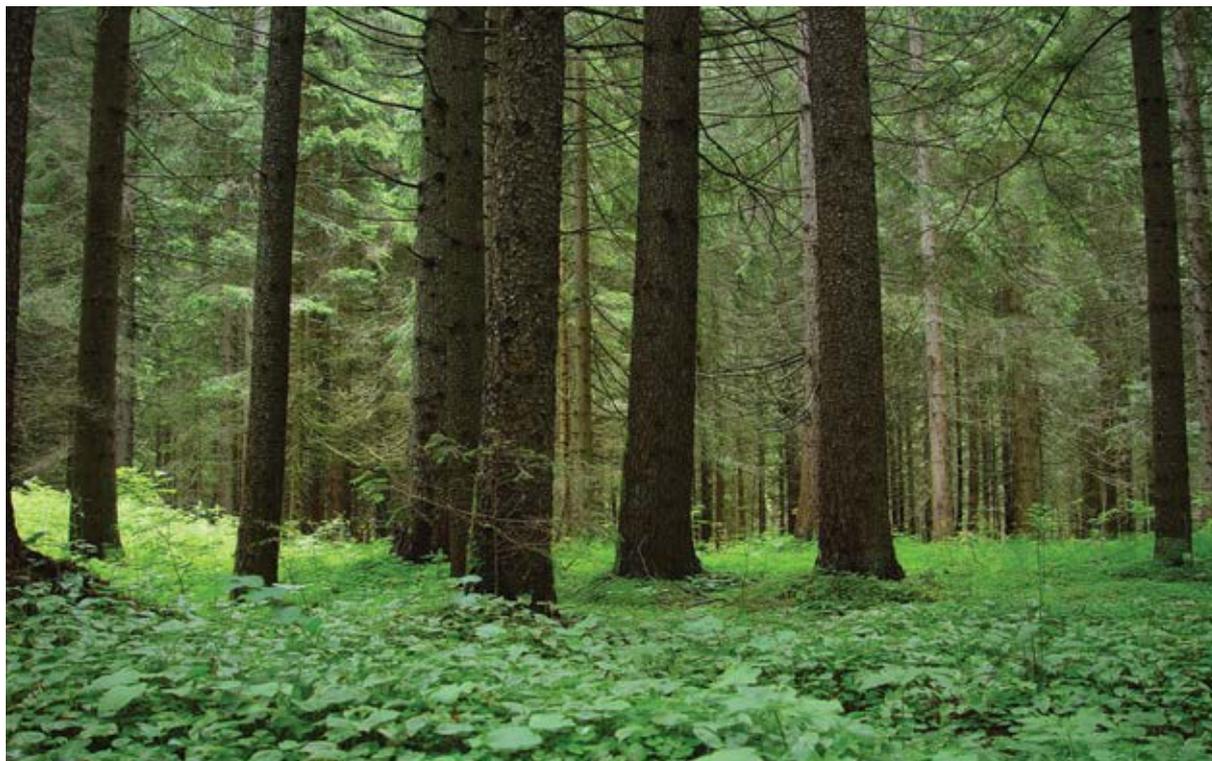
National Geographic

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.

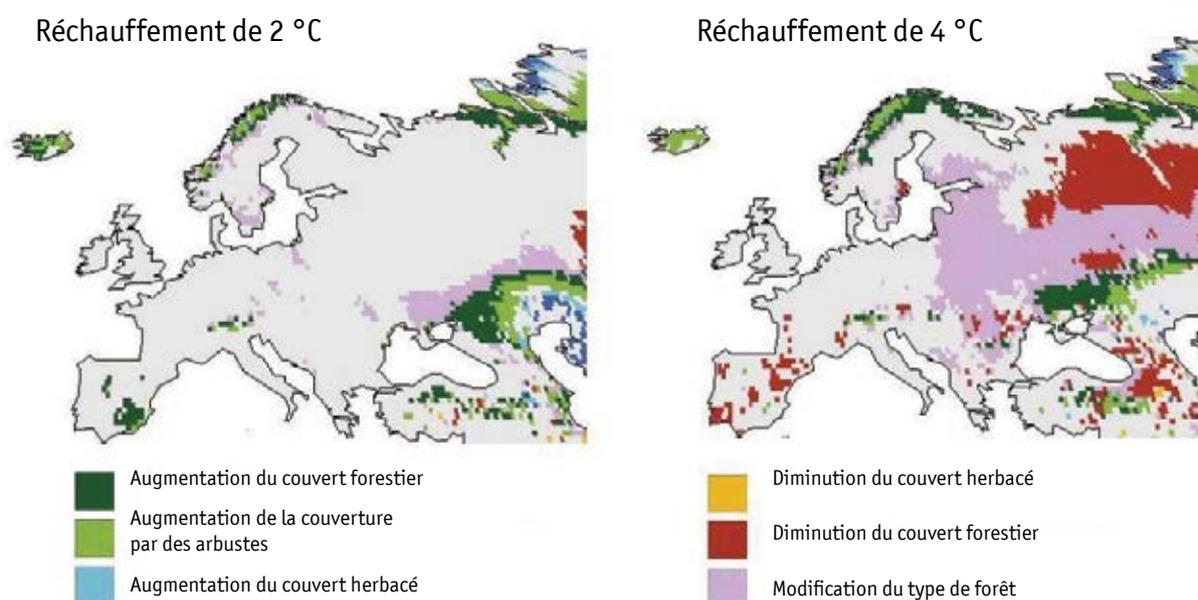
La forêt d'épicéas (Fig. 2.3.6) est en recul dans pratiquement toutes les régions de la Russie. Le système racinaire des épicéas est proche de la surface, ce qui rend cet arbre particulièrement sensible à l'augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses. Dans le même temps, de nombreuses 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.

Fig. 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).

Fig. 2.3.7. Changements prévus concernant le couvert forestier en Europe d'ici 2100, en partant sur 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 Sibirie 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 accidentellement provoqués 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.

Fig. 2.3.8. Incendie de forêt.



L'été exceptionnellement chaud ayant sévi en 2010 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 il ne peuvent plus recueillir les pommes de pin. Les martres 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.

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.

Fig. 2.3.9. Épicéa déraciné après la sécheresse de 2010.



En juin 2010, la région de Kostroma 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.

Fig. 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 les 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 réfléchi 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 (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.

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.

Fig. 2.3.11. Le bois des troncs d'arbres est la plus importante composante du réservoir de carbone de la phytomasse.



Le **réservoir du 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.

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).

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.

Fig. 2.3.12. Les arbres morts font partie du réservoir de carbone du bois mort.



Fig. 2.3.13. Le réservoir de carbone de la litière grossit à l'automne, avec la chute des feuilles.



Fig. 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.

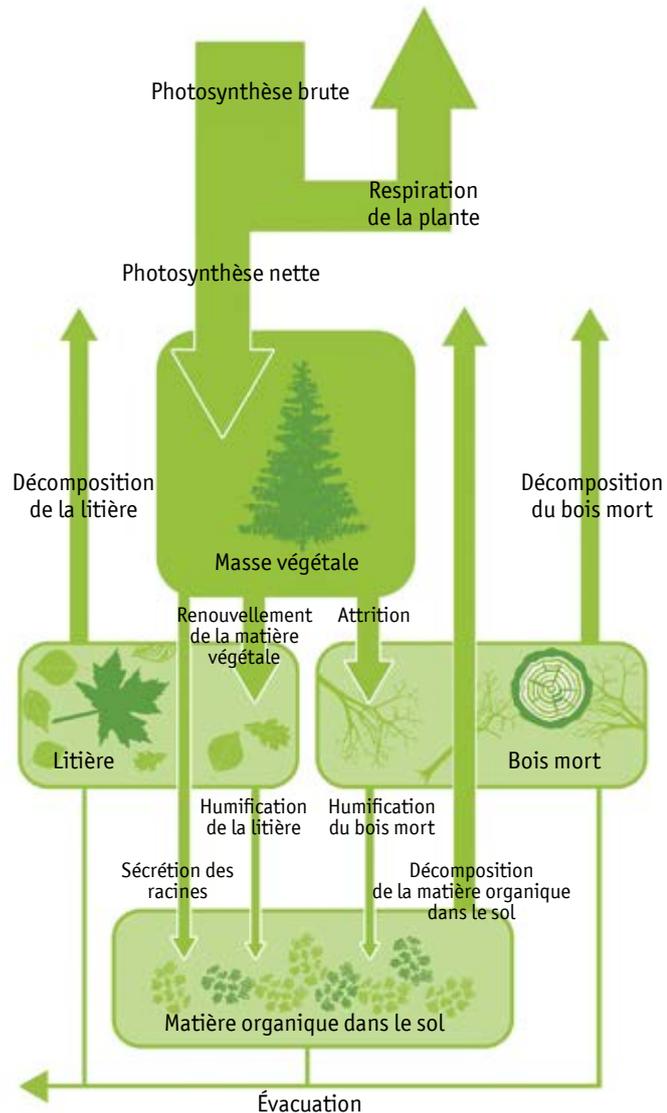
Les divers organismes vivants peuplant une forêt consomment la matière vivante des plantes : chenilles et autres insectes se nourrissant des feuilles des arbres ; oiseaux et rongeurs récupérant les fruits et les semences, et ongulés mangeant l'herbe et les jeunes branches.

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 consommée 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, le carbone de la matière organique se lie avec 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 évacué 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.

Fig. 2.3.15. Le budget carbone d'un écosystème forestier.



Les forêts composées d'arbres matures et anciens absorbent autant dioxyde de carbone de l'atmosphère qu'elles en rejettent. Les réservoirs de carbone de ces forêts demeurent constants. Ils sont telles des piscines : plein à ras bord et incapables de contenir plus, excepté 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 forêts jeunes et 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.

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

Comme nous l'avons vu, les forêts jeunes et anciennes fonctionnent différemment : les forêts jeunes et en pleine croissance absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère et peuvent ainsi partiellement composer 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 de liaison, 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 diminué 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 (Fig. 2.3.17). Au début du XXe 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 XXe 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 permettant la reconstitution de forêts dans d'anciennes zones d'exploitation forestière.

Fig. 2.3.16. L'amadouvier décompose le bois mort et renvoie le carbone dans l'atmosphère.



Fig. 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 XXe siècle.



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 sont 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 intervient de manière très rapide dans certaines régions tropicales. En Papouasie-Nouvelle-Guinée, environ 15 % de la forêt tropicale ont été abattus en à peine 30 ans (de 1972 à 2002) (Fig. 2.3.18) et la qualité de quelque 9 % de la jungle de ce pays s'est significativement détériorée. En conséquence, les émissions de gaz à effet de serre associées à la déforestation pratiquée en Nouvelle-Guinée ont plus que doublé sur cette période de 30 ans.

Environ 10 % du dioxyde de carbone actuellement émis dans l'atmosphère par les activités humaines résultent de la destruction de la forêt tropicale. Les Nations Unies discutent actuellement de la création d'un système mondial de réduction des 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 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.

Fig. 2.3.18. Réduction du couvert forestier sur l'île de Bougainville (Papouasie-Nouvelle-Guinée), 1972-2002.

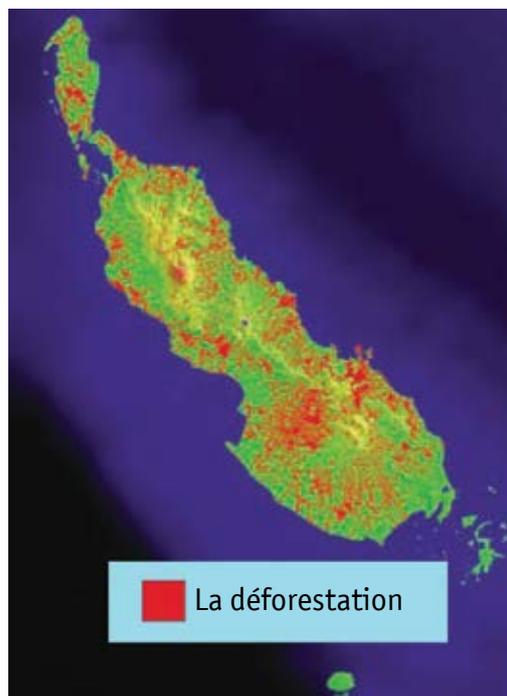


Fig. 2.3.19. Un ancien territoire forestier en Argentine (province d'Iguazu).



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 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 disparaître 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 km²) est abattue ou brûlée chaque année.

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.

Une telle déforestation pourrait être irréversible. Si la déforestation se limitait à une petite superficie, la forêt pourrait alors se redévelopper 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 de 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.

L'Équateur a récemment demandé aux autres pays, par l'intermédiaire des Nations Unies, de verser 3,6 milliards de dollars américains pour la préservation de 4 000 km² de forêt tropicale, mais n'a reçu aucune réponse claire. Le gouvernement a donc laissé la forêt être détruite et ses terres utilisées à des fins de production pétrolière...



Comment gérer le bilan carbone des forêts

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 par le World Wildlife Fund (WWF) 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, brûlant de l'herbe sèche (Fig. 2.3.21), etc., toutes ces personnes 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 aurez fait votre part pour lutter contre le changement climatique !

Fig. 2.3.20. Forêt de cèdres et de feuillus dans le bassin du fleuve Bikin.

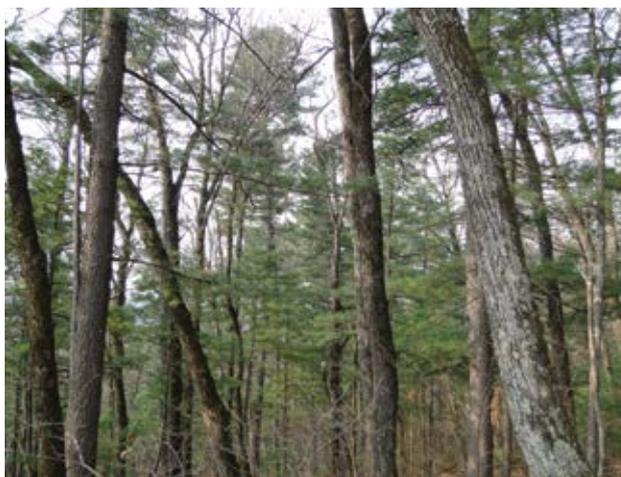


Fig. 2.3.21. Brûlage d'herbe sèche, allumé par l'homme.



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 ?



Exercices

Exercice 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).

Exercice 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.

Exercice 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.

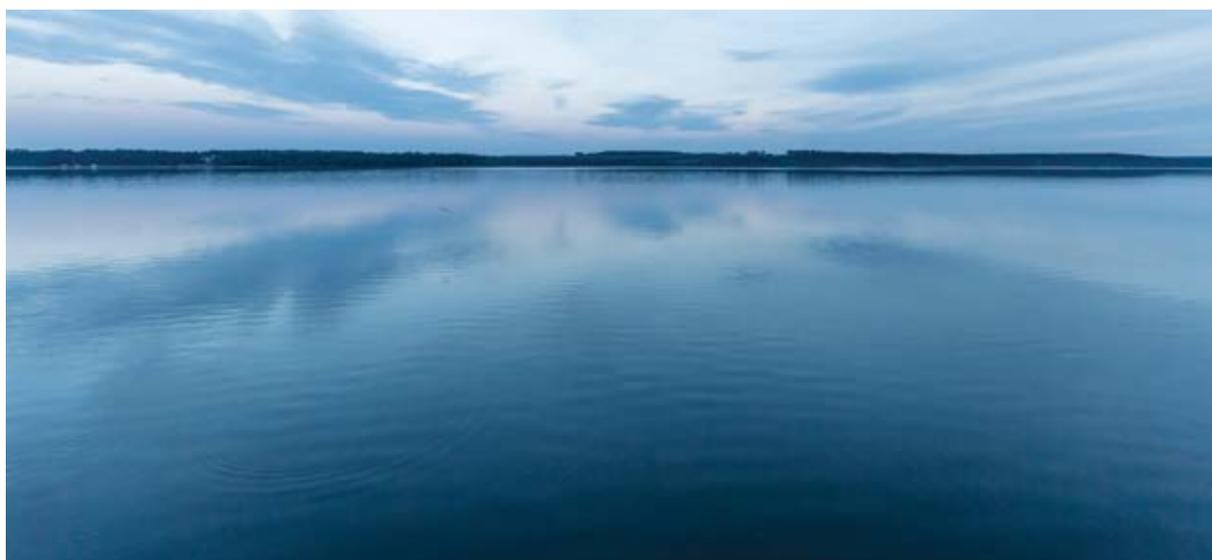
L'expérience. Placez une bouture de plante dans chaque pot et fermez-le. Mettez un récipient à un endroit chaud et lumineux, et couvrez l'autre avec un linge filtrant la lumière. Au bout de 1 ou 2 jours, mettez le feu à la bûchette et utilisez-la afin de déterminer dans lequel des récipients la flamme 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 « obscur ». 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 remplit 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.

Fig. 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 : nombre 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.

Toute l'eau de la planète qui est utilisée ou pourrait l'être par l'homme constitue des « ressources en eau ». Elle comprend l'eau des rivières, des lacs, des canaux, des réservoirs, des mers et océans, l'eau souterraine, l'humidité du sol, l'eau gelée (glace) des glaciers de montagne et calottes glacières polaires, et même la vapeur d'eau de 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 défis environnementaux auxquels nous sommes confrontés à ce jour : sans ces réserves, l'homme ne peut survivre !

Les problèmes de pénurie d'eau ont empiré du fait du changement climatique mondial, mais également du fait de l'augmentation de la demande de denrées alimentaires et des exigences d'hygiène de la population mondiale croissante. Depuis le début du XXe siècle, la population mondiale est passée de 1,6 à 7,2 milliards de personnes, soit 4,5 fois plus ! 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 dénoncé 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, près de 800 millions de personnes dans le monde (dont 40 % en Afrique) n'ont pas accès à l'eau potable.

En septembre 2015, les Nations Unies ont adopté 17 Objectifs de développement durable, accompagnés des cibles associées. Parmi eux, la cible « D'ici à 2030, assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable ».

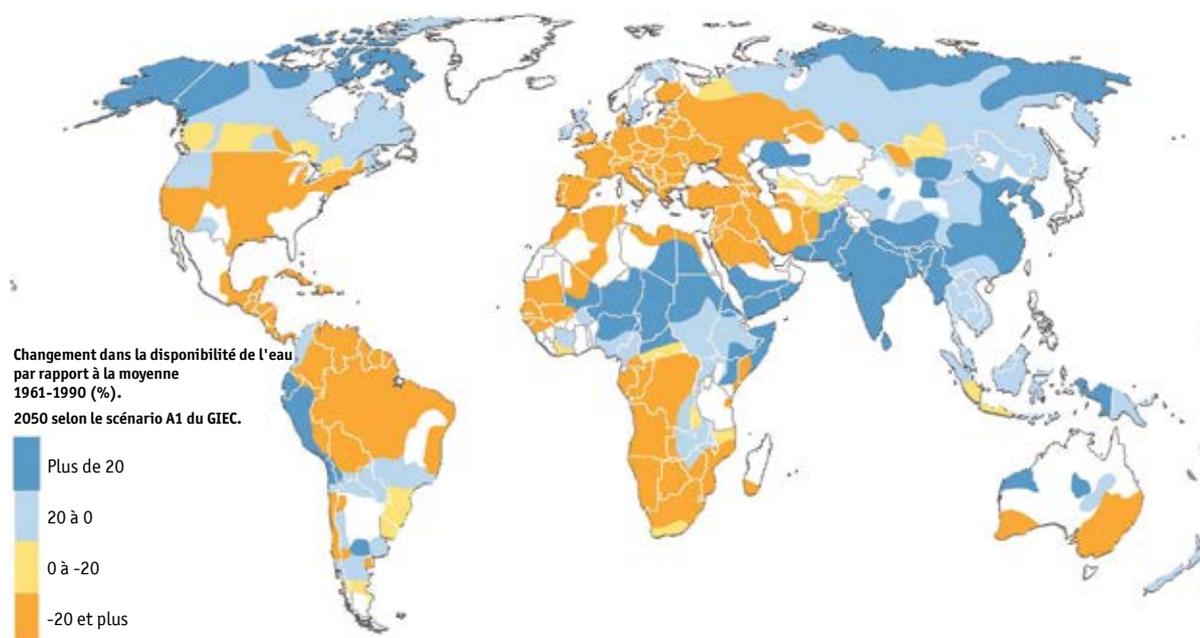
Quels sont les effets du changement climatique sur les ressources en eau ?

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.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat indique que les pénuries d'eau dues au changement climatique toucheront particulièrement les régions arides, notamment les pays méditerranéens, l'ouest des États-Unis, l'Afrique du Sud et le nord-est du Brésil.

Fig. 2.4.2. 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 40 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.

Fig. 2.4.3. Satellite météorologique.

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 embarqués, 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 il y a certaines tendances à long terme. Le changement climatique a des répercussions sur le fonctionnement habituel des rivières. 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 source d'énergie hydroélectrique et source 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.

Fig. 2.4.4. Le fleuve Amazone, en Amérique du Sud, possède la plus grande aire de drainage du monde, d'une superficie de 7 millions de km².





Fig. 2.4.5. Le Nil est le plus long fleuve du monde.



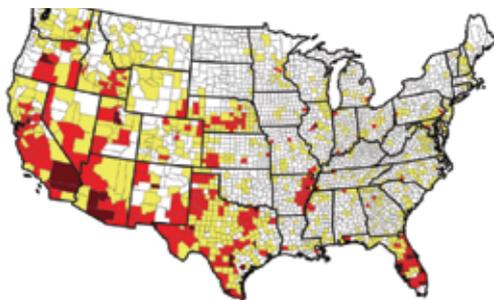
Les pays qui disposent des plus importantes réserves d'eau douce au monde sont le Brésil (le plus grand fleuve du monde, l'Amazone, traverse son territoire), suivi de la Russie et du Canada. Cependant, la répartition des réserves d'eau douce dans le monde est extrêmement inégale. Environ 700 millions 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. 2.4.8). 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. 2.4.2 et 2.4.7).

Fig. 2.4.6. Le lac Baïkal est la plus grande réserve d'eau douce sur Terre.



Fig. 2.4.7. 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.

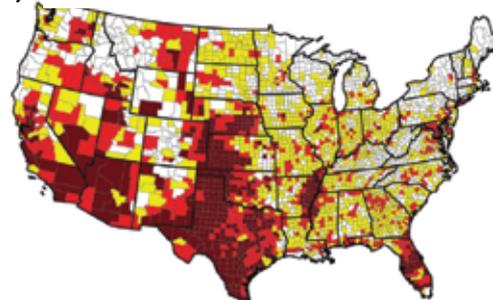
a) Sans les effets du changement climatique



Indice de risque de durabilité de l'approvisionnement en eau (2050)



b) Avec les effets du changement climatique



Indice de risque de durabilité de l'approvisionnement en eau (2050)



Le changement climatique accélérera la fonte des glaciers, modifiera les cycles et les quantités de précipitations, et altérera le débit saisonnier des rivières. En conséquence, 1,8 milliard de personnes seront confrontées à des pénuries d'eau d'ici 2080.

Rapport sur le développement humain 2006, PNUD

Fig. 2.4.8. Les pénuries d'eau sont déjà un problème dans le sud de la Russie.



Comment réduire les risques ?

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.

Premièrement, l'amélioration progressive des prévisions météorologiques est nécessaire. Cela permettra de prévoir à l'avance les éventuels phénomènes météorologiques graves, qu'il s'agisse de fortes précipitations ou d'une extrême sécheresse.

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 devons 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. 2.4.9). Mais avant toute chose, nous devons nous rappeler d'utiliser l'eau de manière efficace.

Fig. 2.4.9. Une usine de dessalement de l'eau de mer aux Émirats arabes unis.



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 récolte 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.

Fig. 2.4.10. 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.



L'eau était également utilisée 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.

Dans le contexte actuel de changement climatique et de tendances météorologiques imprévisibles, il serait particulièrement utile de reprendre et moderniser les anciennes techniques d'adaptation, en tenant compte des connaissances scientifiques les plus récentes.

**Documents de B.K. Bates et al.,
Climate Change and Water Resources, GIEC, Genève, 2008.**

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 ?



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 de votre pays.



2.5. | Les effets du changement climatique sur... l'agriculture

D'aucuns pourraient penser que le changement climatique serait favorable à l'agriculture dans les pays du nord. Mais un climat plus chaud n'est pas nécessairement mieux. 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. 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 Sibirie 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 mûrit un peu plus tôt que les cultures qui n'ont été semées qu'au printemps.



Le changement climatique affecte la production de fruits et de légumes. Les fruits à noyau, 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 tout aussi désastreuse. En 2012, l'industrie de la cerise de l'État du Michigan, aux USA, a perdu 90 % de sa production de griottes à la suite d'une gelée tardive.

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 limitées (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 être menée avant que de nouveaux territoires ne décident de se trouver 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 intervenir.

Des sécheresses, inondations et fluctuations pluviométriques de plus en plus fréquentes dans l'Afrique subsaharienne compliqueront considérablement l'alimentation des populations locales pendant les décennies à venir. Les experts de la Banque mondiale ont calculé qu'une hausse des températures moyennes mondiales de 1,5 à 2°C, couplée à une diminution des précipitations, 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. Les régions vietnamiennes du Delta du Mékong, 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. Ces changements ont une incidence majeure sur l'agriculture, et 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.

Il est important de rappeler que l'agriculture est la principale source de revenus 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. Cette chaîne de conséquences peut être étendue : 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 le jardin dans un proche avenir. Il est capital d'élaborer des stratégies qui permettront à l'agriculture et aux personnes travaillant dans ce secteur de s'adapter aux éventuelles conséquences (positives comme négatives) du changement climatique et d'éviter des pertes importantes.

Le changement climatique a déjà affecté les producteurs de café

L'organisation internationale du café, dont 77 pays sont membres, indique que le réchauffement climatique a déjà occasionné des dommages au commerce du café. La hausse de température de 1°C, constatée sur la planète depuis ces 100 dernières années, a eu une incidence substantielle sur les plantations de café.

La culture du café est une source majeure de revenus pour les pays comme le Brésil, l'Indonésie et le Costa Rica. Le Brésil, à lui seul, produit plus de 2 millions de tonnes de grains de café chaque année. Cependant, des températures plus élevées, des sécheresses et des attaques de parasites plus fréquentes dans les régions dominées par la culture du café, réduisent à la fois la quantité et la qualité des récoltes de café.



Trouver des endroits où les températures sont moins élevées n'est pas chose aisée : dans les pays tropicaux, cela exige de remonter vers les hauts plateaux pour y chercher des sites adaptés. Toutefois, le nombre de ces sites est limité, ils coûtent bien plus cher que les terrains des plaines, et le développement de nouvelles plantations exige des investissements substantiels.

Dans ce contexte, une tasse de café pourrait devenir un produit de luxe dans un proche avenir.



Questions

1. Quelle est la différence entre le blé de printemps et le blé d'hiver ? Lequel serait-il mieux de planter dans 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 à l'aide d'un exemple.
5. Quel est le pourcentage de personnes exerçant des activités agricoles dans le monde ?



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 50 % de la population mondiale vit le long des côtes et assure plus de 70 % de la production mondiale. La plupart des grandes villes du monde, ports et zones touristiques se situent le long des côtes ou à proximité, où l'activité économique est intense.

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 régions côtières sont extrêmement vulnérables aux effets du changement climatique. Ces régions sont principalement menacées par la montée du niveau de la mer, des tempêtes plus intenses provoquant inondations et érosion du littoral, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes.

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 17 cm au cours du XXe siècle. 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 changement climatique mondial est l'une des principales causes de ce processus.

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. Au cours des 100 dernières années, le niveau des océans s'est élevé à un rythme croissant. Alors que le niveau des océans s'élevait de 1,7 mm par an entre 1901 et 2010 (soit 17 cm en un siècle), la hausse constatée entre 1971 et 2010 a été de 2,0 mm par an, et entre 1993 et 2010 de 3,2 mm.

Deux causes sont à l'origine de cette montée du niveau de la mer :

- 1) La fonte des glaciers au Groenland et en Antarctique, qui rajoute de l'eau dans les océans du monde.
- 2) La dilatation thermique des océans. À mesure que les températures augmentent, les océans se dilatent et occupent plus d'espace.

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. Toutefois, une plage d'augmentation peut être définie.

Dans le cadre de son cinquième rapport d'évaluation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat indique que, selon différents scénarios, le niveau des océans du monde s'élèvera de 17 à 38 cm d'ici à 2050, puis de 26 à 82 cm d'ici à 2100. La montée 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 XXI^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.

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.

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.

Des éoliennes ont été utilisées pour pomper l'eau des lacs.



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

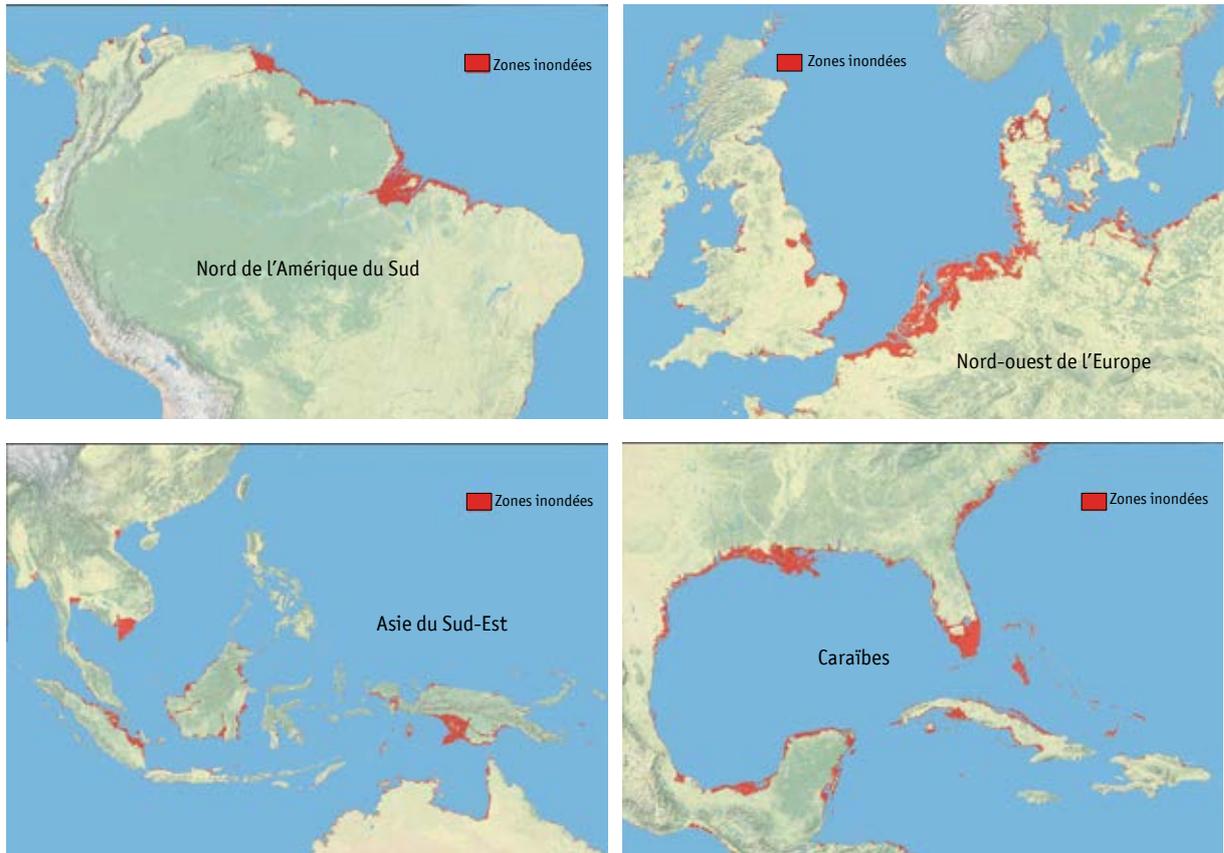


Une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 1 m engloutira jusqu'à 15 % des terres cultivables d'Égypte, et 14 % des terres cultivables du Bangladesh, contraignant ainsi des millions de personnes à s'installer ailleurs. L'eau salée de la mer pourrait s'infiltrer dans les eaux côtières souterraines,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

Selon les prévisions, 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. En Chine, la densité moyenne de population le long de ces fleuves s'élève parfois à 800 habitants par km².

Le monde dénombre 41 petits États insulaires, et pour bon nombre d'entre eux 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.

Fig. 2.6.1. 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.



Tragédie aux Philippines

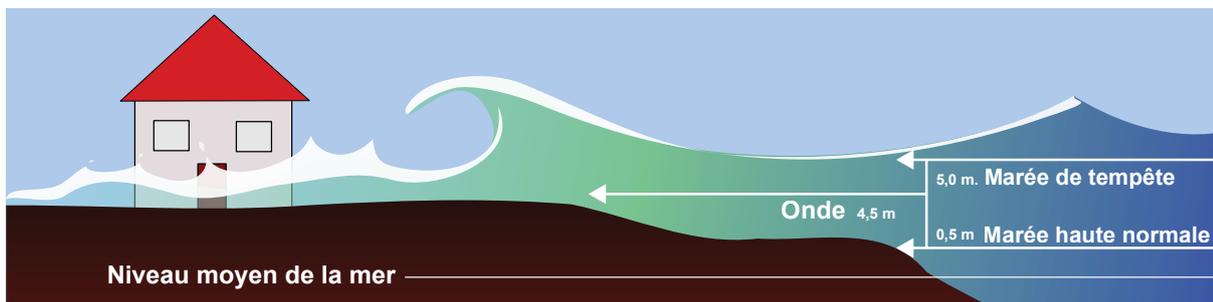
En novembre 2013, les Philippines ont été frappées par une catastrophe naturelle comparable, par son envergure, à la tragédie survenue au Japon deux ans plus tôt, lorsque celui-ci a été frappé par un tsunami occasionné par un séisme sous-marin dans l'océan Pacifique. Les Philippines sont un archipel 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.

Fig. 2.6.2. Onde de tempête.



Érosion et destruction du littoral

L'érosion et la destruction du littoral par la mer sont une autre conséquence de la montée du niveau des océans (Fig. 2.6.3 à 2.6.5). L'érosion touche particulièrement la côte arctique, qui était auparavant protégée par la glace, mais 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.

Fig. 2.6.3. 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. 2.6.4). 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. 2.6.5), de grandes zones de peuplement sont submergées dont les habitants sont contraints de se réinstaller ailleurs, et les routes nécessitent d'être déviées.



Fig. 2.6.4. 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).

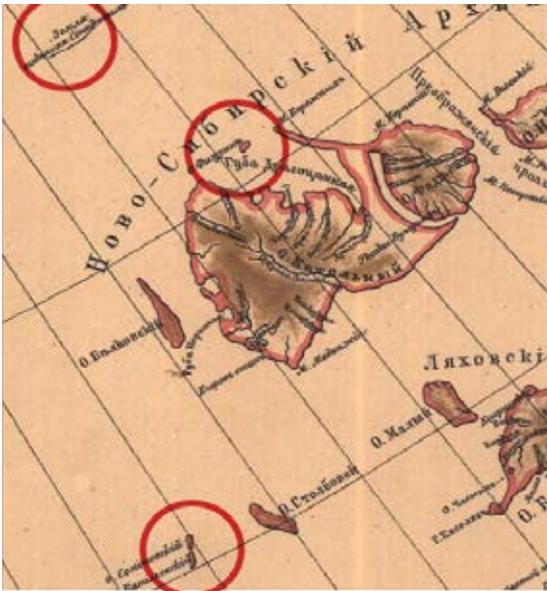
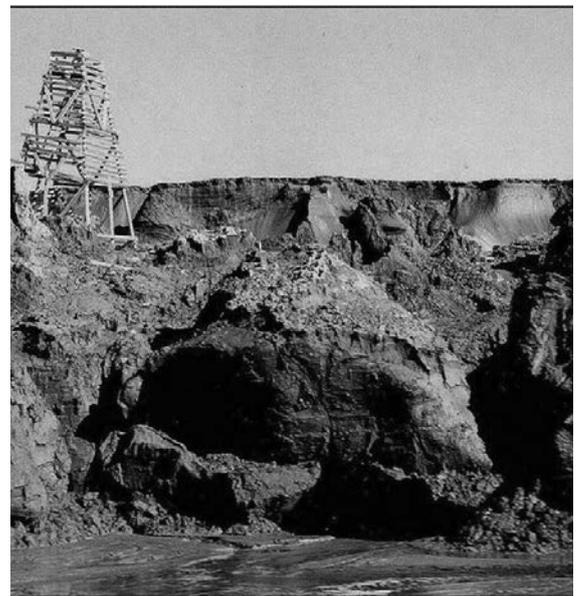


Fig. 2.6.5. Le phare côtier de Vankin (mer de Sibérie orientale, île de Bolshoi-Lyakhovsky), qui n'existe plus.



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 plutôt 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

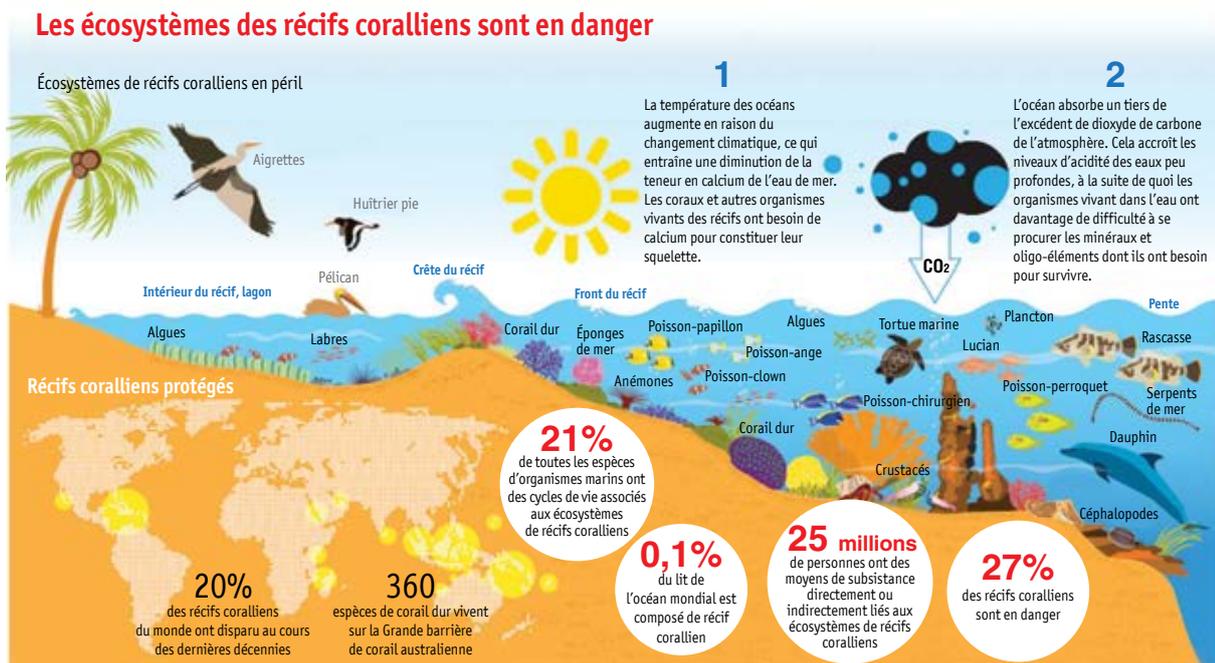
Outre son impact sur les populations et l'économie, la montée du niveau de la mer affecte également les écosystèmes marins et terrestres situés le long des côtes.

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.

Fig. 2.6.6. 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 CO₂ présent dans l'atmosphère augmentent, l'absorption de CO₂ 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.

Fig. 2.6.7. Prévisions de modification de l'acidité des eaux océaniques de surface d'ici la fin du 21e siècle, selon le scénario de changement climatique le plus favorable (à gauche) et le moins favorable (à droite).

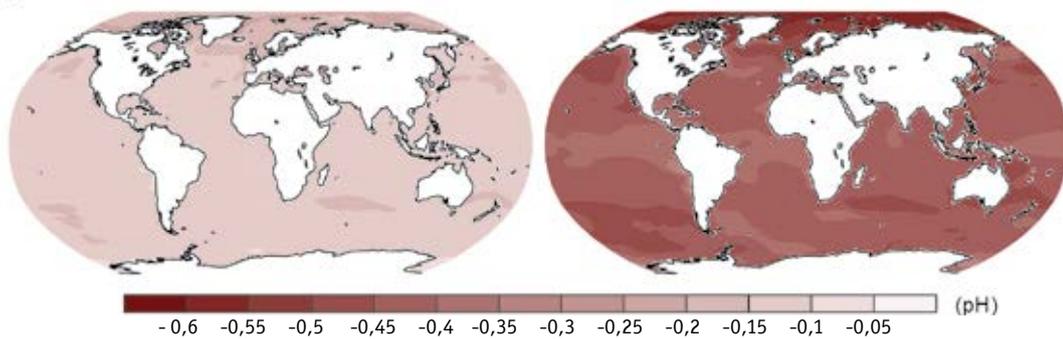
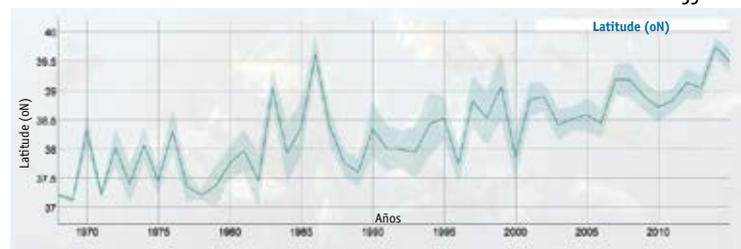


Fig. 2.6.8. Le bar noir migre vers le nord, car les océans se réchauffent.



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 phytoplanctons, qui constitue l'alimentation de base des poissons de mer, à mesure que la température de l'eau augmente.

Il a déjà été constaté que 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 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 la productivité marine.

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.



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. Pour 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 ?



Exercice

Exercice 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 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.

Exercice 2. Indiquez sur une carte isocontour comment l'aspect du continent sud-américain changerait si le niveau des océans montait de 100 m : utilisez des crayons de couleur pour colorier les étendues de terre qui disparaîtraient 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'exercices.

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. Dans 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 s'élève 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 »).

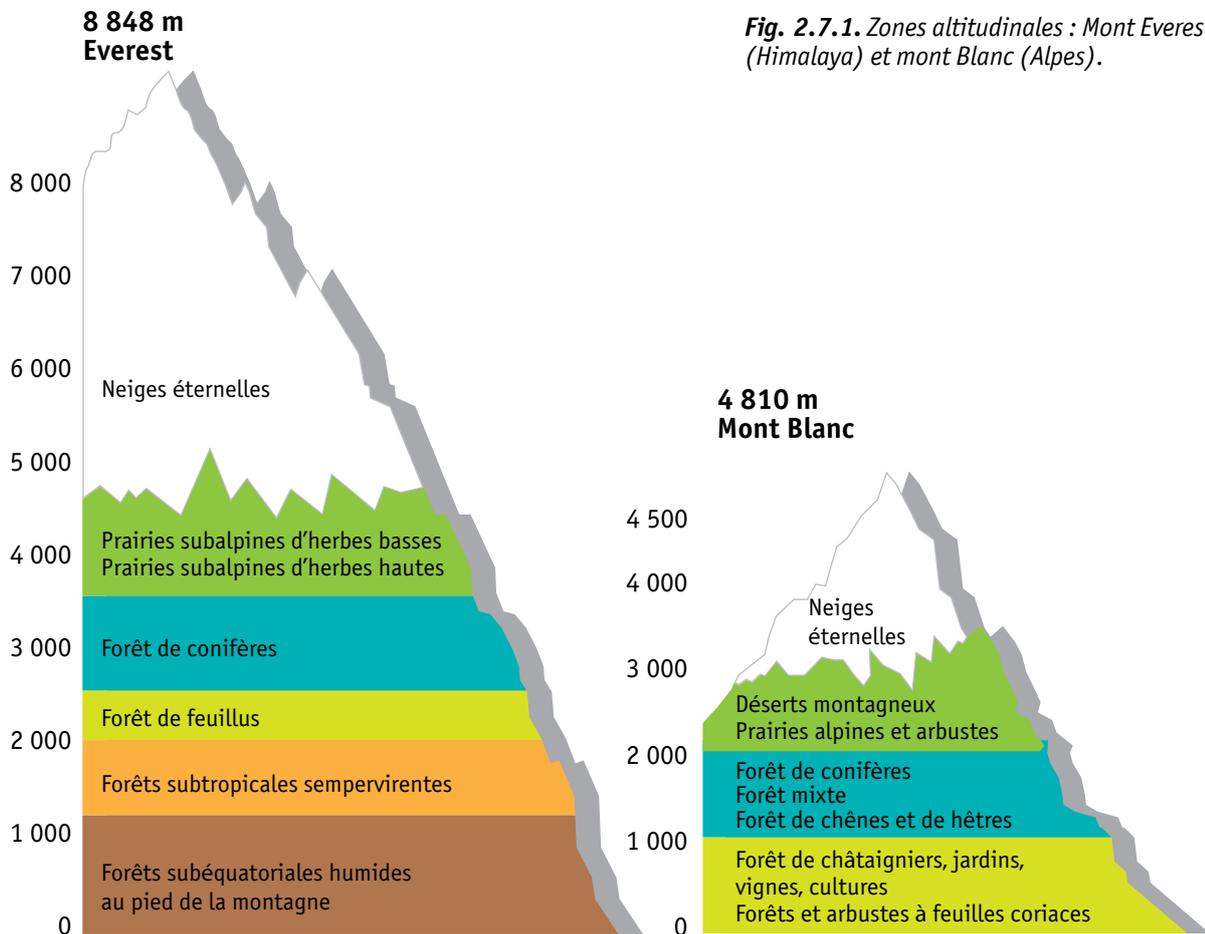


Fig. 2.7.1. Zones altitudinales : Mont Everest (Himalaya) et mont Blanc (Alpes).



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.

N. Roerich. Himalaya. Everest. 1938.

Les Andes sont, pour leur part, la chaîne de montagnes la plus longue de la planète. Cette immense chaîne de montagnes sud-américaine 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 Aconcaguaga (6 960 m).

Le système montagneux le plus large d'Europe est la chaîne de montagnes des Alpes, qui couvre huit pays : Autriche, Allemagne, Italie, Liechtenstein, Monaco, Slovaquie, 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, il s'agit également du plus haut sommet de Russie.

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

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 ex-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).

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.

Fig. 2.7.2. 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 A.D., 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 XVIIe et XVIIIe 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 donner 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.

Fig. 2.7.3. W. Rothe. Crossing St. Gotthard Pass, 1790.



Cependant, au cours des 40 dernières années, les glaciers du monde entier ont reculé particulièrement vite (Fig. 2.7.4). 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.

Fig. 2.7.4. Modification de la masse des glaciers à travers le monde, 1945-2005.

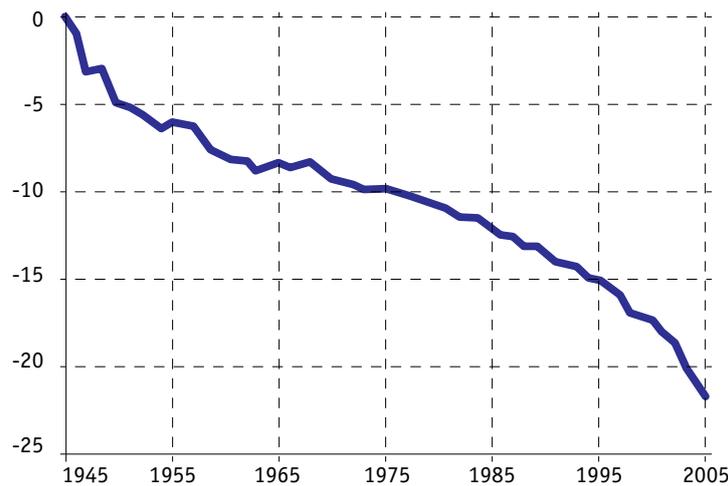


Fig. 2.7.5. C'est ainsi que les scientifiques étudient les glaciers.



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.

Fig. 2.7.6. Le glacier Gangotrî.



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 la nouvelle d'Ernest Hemingway intitulée « Les Neiges du Kilimandjaro », a presque entièrement disparu.

Fig. 2.7.7. La calotte glaciaire et la neige du Kilimandjaro ont presque entièrement fondu.



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 initialement réputé devraient se dépêcher !

Fig. 2.7.8. Parc national de Glaciers en août 2013.



Fig. 2.7.9. Fonte du glacier Grinnell dans le parc national de Glacier.



Les glaciers d'**Argentière et du Mont-Blanc**, comme de nombreux autres glaciers des Alpes, ont entamé leur net déclin après 1870, et ont depuis reculé de plus de 1 km. Selon l'Agence européenne pour l'environnement, 75 % des glaciers alpins auront fondu d'ici 2050.

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**.

Le glacier **Azau** dans le Caucase a subi d'importants changements. À la fin du XIXe 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 XIXe siècle. Le glacier **Sofia**, placé en 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.

Fig. 2.7.10. 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.

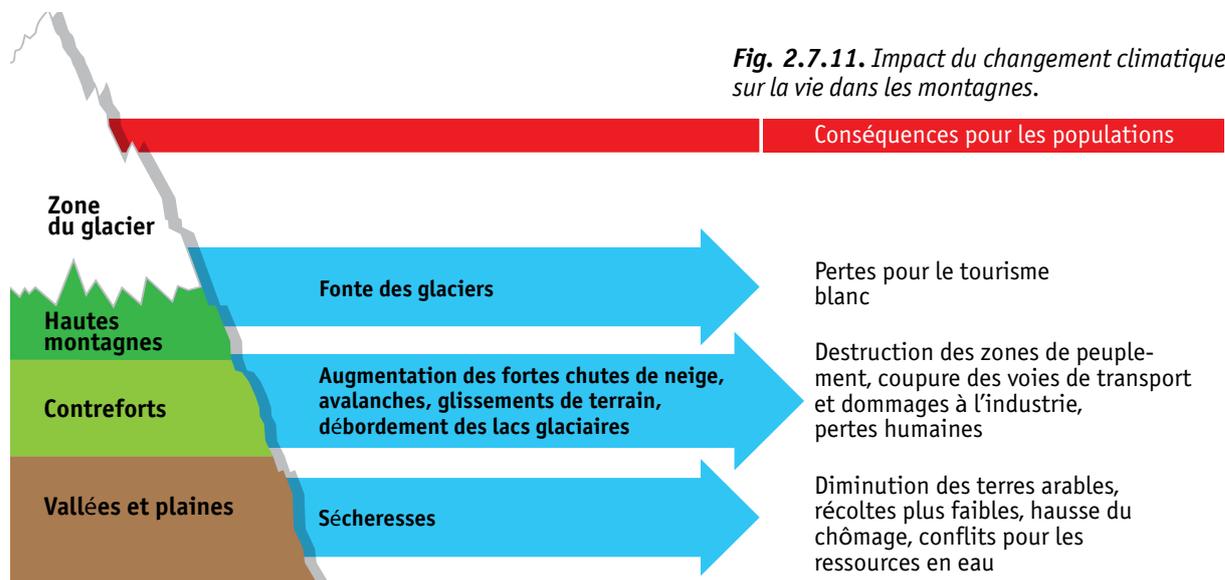


Les effets du changement climatique sur les populations vivant dans les montagnes

Vivre dans les montagnes 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.



Fig. 2.7.11. 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 par des 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 subsistance. 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. 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 1300 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.



Pont surplombant le lac de Trift, Suisse.

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.



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 30 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.

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.



Une avalanche est une imposante 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. Début mars 2012, une série d'avalanches en Afghanistan a détruit des maisons et fait plus de 100 morts.

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.

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.

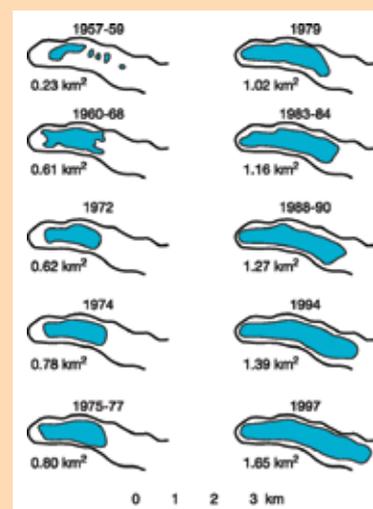
Les risques pour la population locale peuvent être réduits en creusant des canaux de protection et en construisant des barrages avant que de telles inondations ne se produisent.

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.

Fig. 2.7.12. Lacs glaciaires dans l'Himalaya.



Fig. 2.7.13. La taille du lac Tsho Rolpa s'est multipliée par sept au cours des 50 dernières années.



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 diminution du volume de 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 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 $+30^{\circ}\text{C}$ 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 ?



Exercice

Exercice 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 ?

Exercice 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 ?

Katsushika Hokusai « Inume Pass, Koshu ». Issu de la série « Thirty-six Views of Mount Fugi ». Japon, 1830.



Exercice 3. Jeu

Les joueurs se divisent en deux équipes.

L'équipe N1 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 N2 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 km² (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.

Fig. 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 s'il faisait une température de l'air 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.

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.

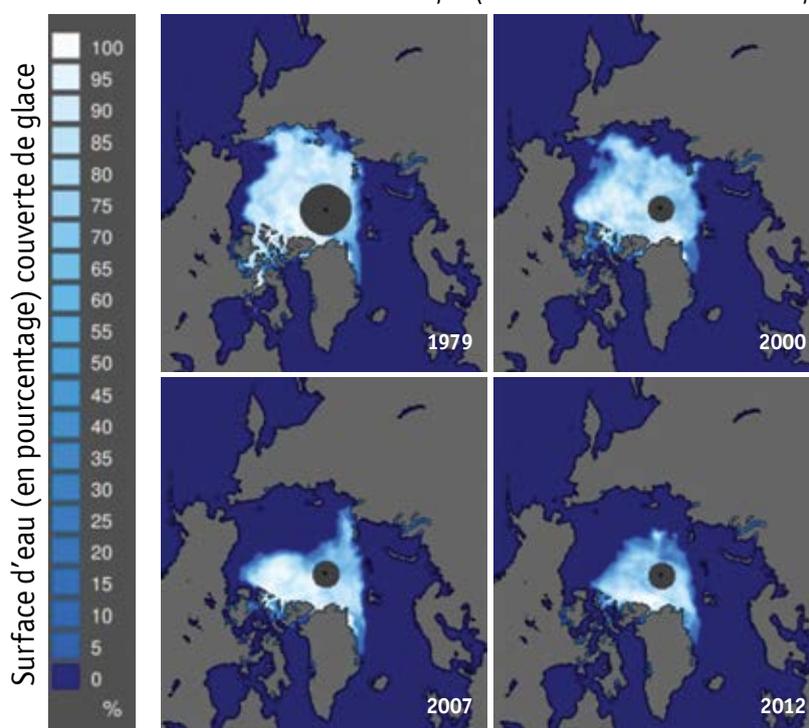


2. Une quantité d'eau plus importante implique une plus grande évaporation de l'humidité et davantage de nuages. Souvenez-vous, les nuits sont relativement douces lorsque le ciel est nuageux, car les nuages retiennent la chaleur, et il fait bien plus froid par nuit claire. De même, en Arctique, lorsque 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.

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). Au cours des 35 dernières années, l'étendue de la couverture glaciaire dans l'océan Arctique et ses mers a diminué de 15 à 20 %.

Fig. 2.8.2. Cartes de la couverture glaciaire dans l'océan Arctique (minimum annuel observé en septembre).



La superficie de la couverture glaciaire est généralement mesurée au moment du minimum de son extension, normalement 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).

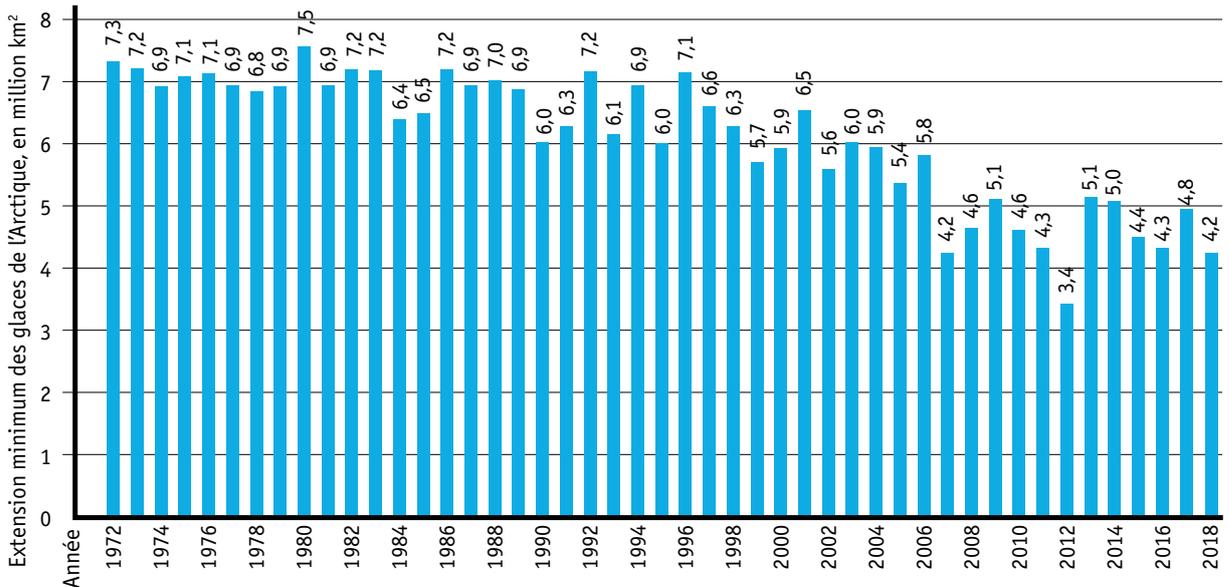
Bien sûr, la glace recouvre toujours la totalité de l'Arctique en hiver. Même un énorme réchauffement de 15 à 20°C ne permettrait pas d'élever les températures hivernales des régions polaires au-dessus de zéro. Mais l'épaisseur de la glace serait beaucoup plus réduite. Cet effet est clairement visible, 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 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 resteront praticables. Cela est notamment vrai pour le détroit de Vilkitsy 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 restent 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.

Fig. 2.8.3. Extension des glaces de l'océan Arctique (minimum annuel) entre 1972 et 2018.



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

Fig. 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.

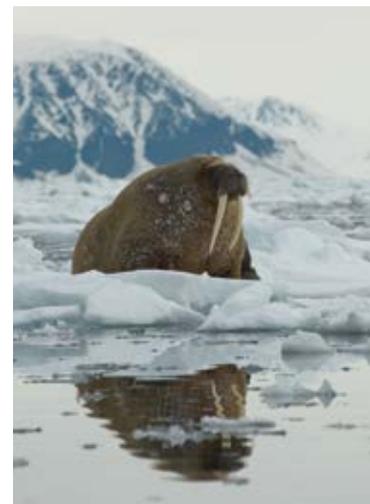


nombre de ces animaux sont bloqués sur la côte. Ils sont affamés et peuvent entrer dans les villages à la recherche de nourriture parmi les ordures, ce qui peut être très dangereux, tant pour les animaux que pour les populations.

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 (des radios et des téléphones satellites devant composer leur équipement). Cela permettrait de prévenir à la fois les attaques d'ours et le braconnage.

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 être conduits à écraser les plus jeunes se trouvant sur leur passage.



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 a en 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.

Fig. 2.8.5. Un nombre record de quelque 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.



Il est arrivé que des milliers de morses apparaissent à de nouveaux endroits (Fig. 2.8.5), y compris dans 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.

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 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 blanche fourrure des jeunes phoques était particulièrement prisée. La chasse 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 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 fonte du pergélisol pose un autre problème majeur (Fig. 2.8.6).

La région du pergélisol arctique est peuplée depuis plusieurs milliers d'années, toutefois certains 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.

Dans la ville russe de Yakoutsk, un puits fut creusé afin de déterminer jusqu'à quelle profondeur le sol gelait ; en 1686, il fut creusé sur une profondeur de 30 m, sans toutefois atteindre le fond du pergélisol. 150 ans plus tard, le travail sur le puits reprit et celui-ci fut creusé sur une profondeur de 116 m, toutefois à cette profondeur le sol était toujours gelé.

Fig. 2.8.6. Fonte du pergélisol, Spitsbergen (Norvège).



La nature du pergélisol n'a été comprise qu'à la fin du XIXe siècle, lorsqu'il a été constaté que le pergélisol allait jusqu'à 1500 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 installées 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.

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 (Figs. 2.8.8, 2.8.9).

Fig. 2.8.7. Une section verticale du pergélisol avec des couches de glace.



Fig. 2.8.8. Une section ferroviaire endommagée par les effets du pergélisol.



Fig. 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 (Figs. 2.8.10, 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 l'étendue des dommages subis augmente rapidement. D'importantes sommes vont devoir être investies dans la congélation directe du sol et dans la conception de bâtiments plus onéreux, capables de résister aux nouvelles conditions.

Fig. 2.8.10. Un immeuble s'étant effondré dans le village de Chervis (Russie).



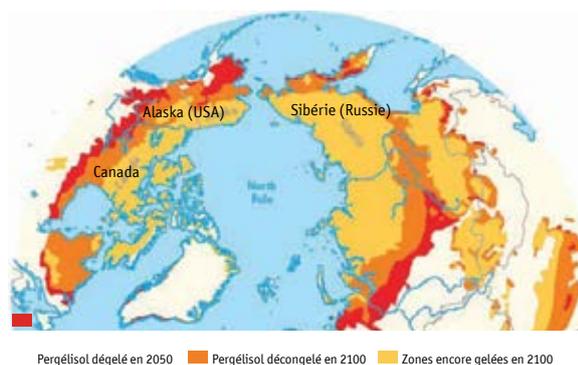
Fig. 2.8.11. Un angle d'immeuble s'étant effondré à Yakutsk (Russie).



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 au-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 la froide atmosphère au-dessus du sol, à la suite de quoi elle reflue vers le bas et le processus se répète.

Fig. 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 d'ici 2100.



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, ce qui 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).

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).

Fig. 2.8.13. Route équipée de thermosiphons refroidissant le sol.



Fig. 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 est bien mieux qu'un puissant blizzard empêchant quasiment toute activité extérieure, y compris 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 transformer en glace et gonfle, ce qui contribue à agrandir la fissure. La glace fond, davantage d'eau s'infiltrer, qui gèle à son tour, ce qui agrandit d'autant plus la fissure. Plus ce cycle se répète, plus l'édifice se dégrade 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, constituent leur principale source de revenus et sont très importants pour la préservation des traditions et de la culture de ces peuples et des territoires où ils vivent.

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 dans les 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.

Fig. 2.8.15. Mode de vie des peuples autochtones de l'Arctique.



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 et 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.

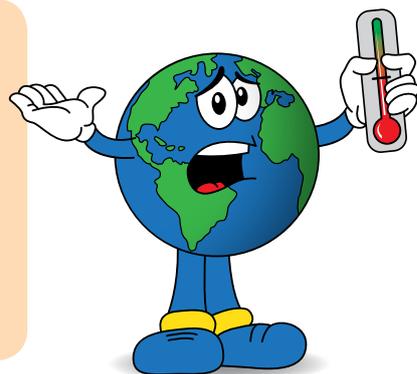
Le climat de plus en instable de l'Arctique et le réchauffement mondial donneront lieu à des blizzards plus fréquents et à de brusques variations de température.

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 potentielles 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 morcellent 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 ?
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 ?



Exercice

Exercice 1. Expérience

But de l'expérience : observer comment le volume d'eau évolue lorsque l'eau gèle.

Matériel : bouteilles en verre étanches, eau.

L'expérience : 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.

Exercice 2. Expérience

But de l'expérience : observer les changements apportés aux propriétés physiques des matériaux lorsqu'ils gèlent et dégelent.

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.

L'expérience : prenez un pot de crème aigre en carton ou en plastique. Mettez-le au congélateur. Lorsque la crème gèlera, elle ne sera pas en un seul morceau : 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.

Fig. 2.9.1. La vieille ville de Berne en 1820.



Néanmoins, depuis la fin du XIXe siècle, on constate un afflux majeur de population vers les villes. Ce processus s'appelle l'**urbanisation**.



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 les 50 % (Fig. 2.9.2). L'étude du climat des villes importe donc à plus de la moitié au moins de la population de la planète.

Fig. 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.

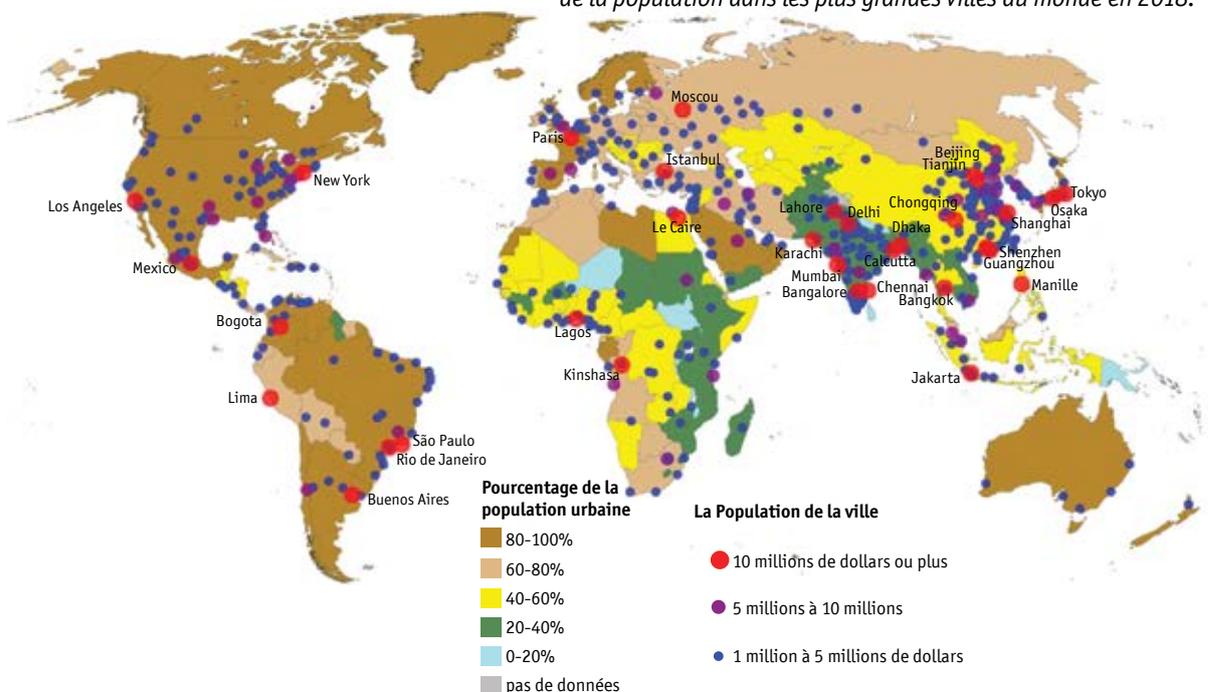


Tableau 2.9.1. Villes du monde en 2016.

Villes de plus de 10 millions d'habitants			
	Ville	Nation	Population (millions de personnes)
1	Tokyo	Japon	38,1
2	Delhi	Inde	26,5
3	Shanghai	Chine	24,5
4	Mumbai	Inde	21,4
5	São Paulo	Brésil	21,3
6	Beijing	Chine	21,2
7	Mexico	Mexique	21,2
8	Osaka	Japon	20,3
9	Caire	Egypte	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	Kolkata	Inde	15,0
15	Istanbul	Turquie	14,4

Fig. 2.9.3. Shanghai, avec plus de 24 millions d'habitants, est l'une des plus grosses villes du monde en termes de population.



Pourquoi les villes sont-elles qualifiées d'îlots de chaleur ?

Les villes sont des points chauds écologiques uniques sur la planète, en prenant le terme « chaud » au pied de la lettre : 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**.



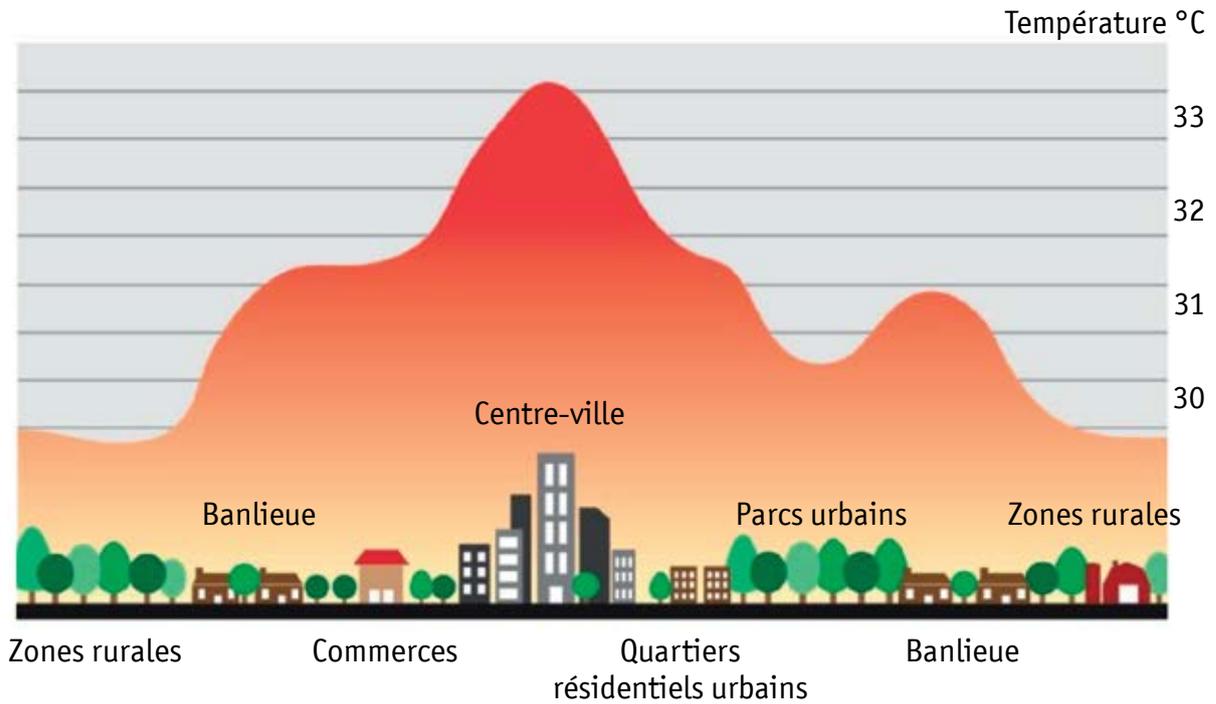
***Un îlot de chaleur** est une zone située dans le centre d'une grande ville, où la température de l'air est supérieure à celles des zones périphériques. L'effet d'îlot de chaleur urbain se fait surtout sentir en soirée et au cours de la nuit, notamment au printemps et à l'automne, lorsque la différence 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.



Fig. 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).

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 ».

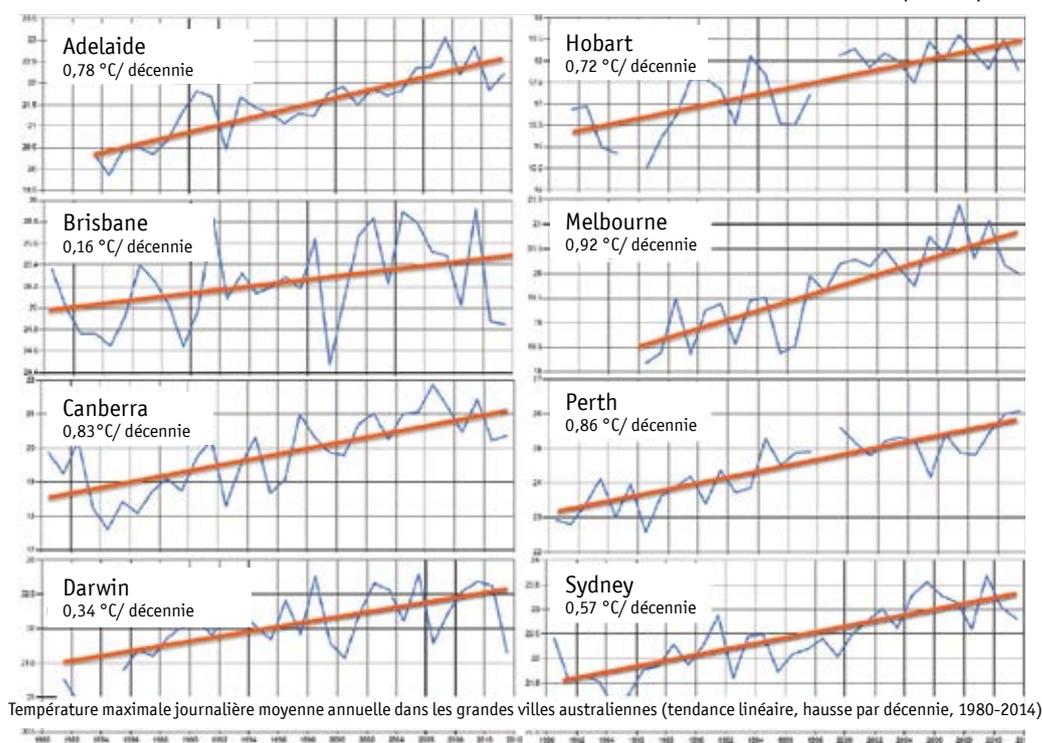


Quels sont les effets du changement climatique sur les habitants des villes ?

Le changement climatique a des effets substantiels sur la santé et la vie humaine. Nous savons déjà que notre santé dépend de facteurs comme l'hygiène de vie, 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).

Fig. 2.9.5. Modification de la température maximale journalière moyenne annuelle dans les grandes villes australiennes entre 1980 et 2014. Tendence linéaire, hausse exprimée par décennie.



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 exposées par temps chaud.

Les chaudes nuits d'été en ville sont particulièrement dangereuses pour la santé. Si une vague de chaleur dure plus d'une semaine, elle peut entraîner des problèmes cardiaques et même des décès chez les personnes âgées et les personnes malades. L'intense vague de chaleur ayant frappé l'Europe à l'été 2003 a coûté la vie à 50 000 personnes.

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 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 12h 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.



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 centrales 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 dans des parties de la Russie européenne où ils ne l'avaient jamais été auparavant, 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.

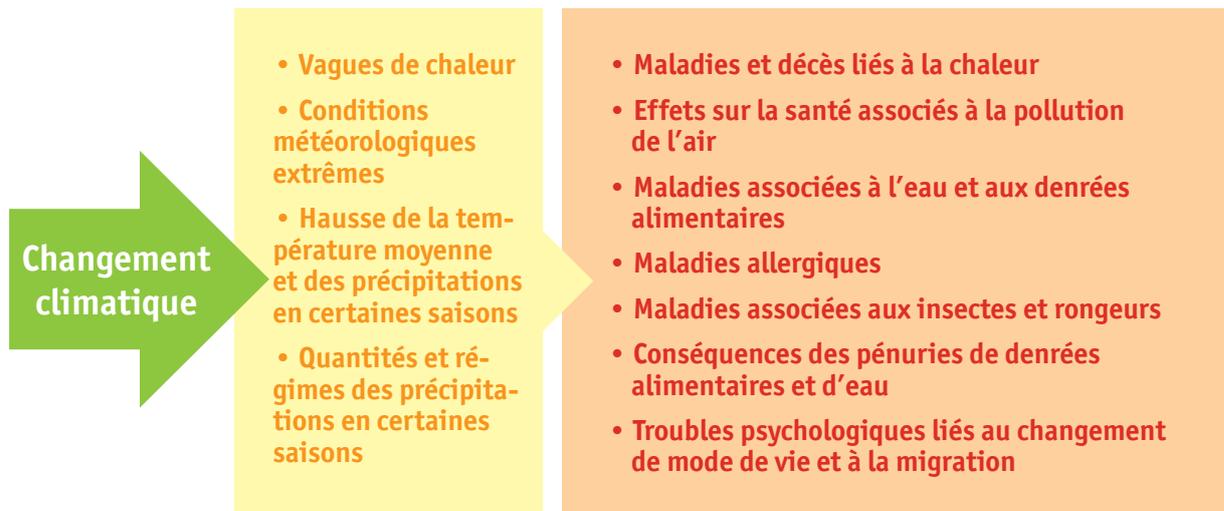
La Malaria (de l'italien « mala aria », signifiant « mauvais air »), appelée également « fièvre des marais », est une maladie infectieuse transmise à l'homme par des piqûres de moustiques infectés, entraînant de fortes fièvres. La propagation de la malaria dépend de la présence de moustiques porteurs 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, et même dans ces pays l'altitude est un facteur important : la maladie est beaucoup moins présente sur les hauts plateaux, 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.



Fig. 2.9.6. Les effets du changement climatique sur la santé.



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, celle-ci peut amener avec elle serpents venimeux et 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 mauvais 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.

Depuis dix ans, les scientifiques étudient plus en profondeur les effets du changement climatique sur les villes. Ces études 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.



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. Quels sont les effets négatifs du réchauffement climatique sur la santé ?
5. Quelles sont les précautions à prendre en période de chaleur ?



Exercices

Exercice 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 ?

Exercice 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... 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 et un niveau de vie différents. Ils sont donc tous touchés différemment par le changement climatique. 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 ont accès à des soins de santé et une éducation de qualité, des opportunités professionnelles satisfaisantes, et 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 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.



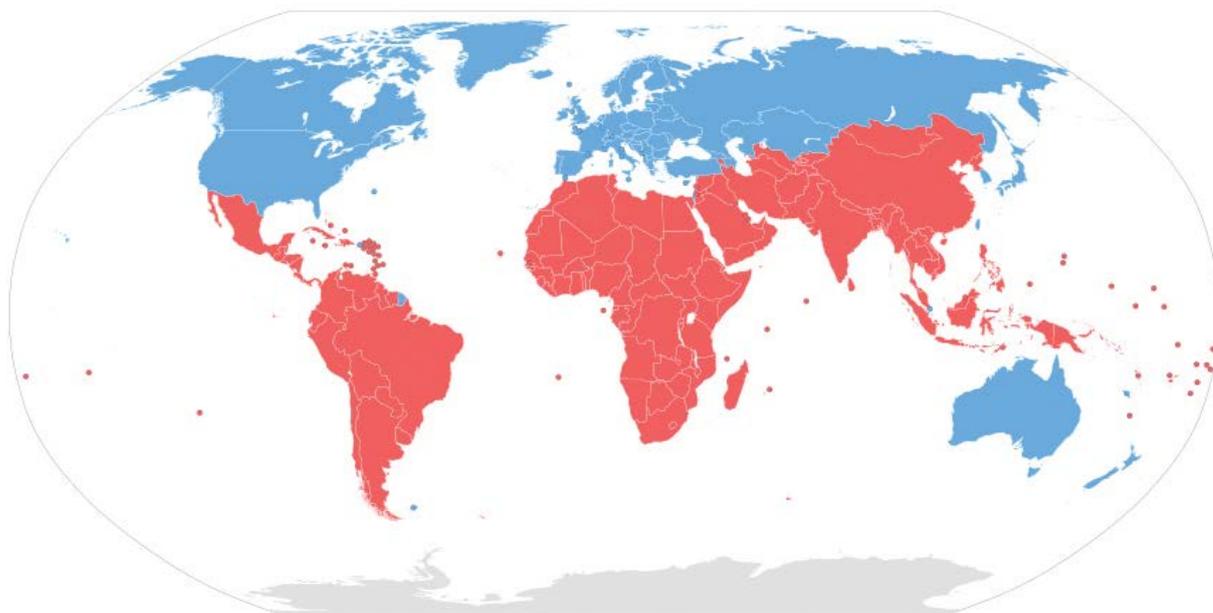
Les pays en développement n'ont commencé à développer leurs économies que récemment. Ils sont encore fortement dépendants des secteurs traditionnels : cultures, élevage de bétail et exploitation minière. Ils ont un niveau de vie inférieur, un système de soins de santé moins développé, moins de programmes sociaux pour la population, et moins d'opportunités en matière d'éducation ou 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, le Mexique et d'autres, qui rattrapent rapidement leur retard sur les pays développés grâce à une croissance rapide de la production industrielle. De nombreuses choses que nous utilisons chaque jour (vêtements, chaussures, plats, mobilier, appareils, jouets) sont fabriquées dans ces pays, notamment en Chine. La Chine est désormais, derrière les USA, le second producteur de biens et de services en termes de volume.



D'autre part, 47 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 catastrophes naturelles. La plupart des pays les moins développés se situent en Afrique et en Asie, et les plus pauvres d'entre eux sont le Burundi, le Liberia, la Sierra Leone, le Malawi, l'Éthiopie, la Tanzanie, le Bangladesh et la Zambie. La pauvreté dans ces pays est inquiétante, la majeure partie de la population vivant avec moins de 2 dollars américains par jour. La population manque de nourriture, d'eau potable, d'hôpitaux et d'écoles. Les gouvernements de ces pays ne peuvent verser de prestations de sécurité sociale ou de retraite à leurs citoyens, les familles tentent donc d'avoir autant d'enfants que possible pour aider les parents dans les travaux ménagers, les travaux de champs et pour les prendre en charge durant leur vieillesse. Par ailleurs, de 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 800 millions de personnes (11 % de la population mondiale) vivent actuellement dans les pays les plus pauvres du monde, mais ces pays contribuent à moins de 1 % de l'économie mondiale.

Fig. 2.10.1. Pays du Nord (bleu) et du Sud (rouge).



Clivage Nord-Sud

Les pays développés et les pays en développement sont souvent grossièrement divisés entre « Nord » et « Sud ». Il est facile de comprendre pourquoi en regardant la carte du monde (Fig. 2.10.1) : la quasi-totalité de tous les pays développés (à l'exception de l'Australie et la Nouvelle-Zélande) se situent dans la zone tempérée de l'hémisphère nord, tandis que les pays en développement se situent principalement dans l'hémisphère sud.



Inégalité sociale

En octobre 2011, la population mondiale était de 7 milliards. La grande majorité de la population mondiale – 5,9 milliards, ou 84 % de la population totale – vit dans des pays en développement, et seuls 16 % ou 1,1 milliard de personnes (aussi appelé le « milliard de fortunés ») vivent dans des pays développés. Dans le même temps, 16 % des personnes vivant dans des pays riches consomment le gros de la production mondiale. La contribution des populations vivant dans les pays développés aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (c'est-à-dire leur « empreinte carbone ») est bien plus élevée que celle des populations vivant dans les pays en développement, car la création de la production quotidienne consommée par les populations des pays riches exige des quantités considérables de ressources et d'énergie. À titre d'exemple, il faut 3,5 fois plus de ressources pour maintenir la qualité de vie de l'Américain moyen que celle d'un habitant moyen de la Terre, et l'Américain moyen consomme 9 fois plus que l'Indien moyen. Le milliard de fortunés a donc une plus grande responsabilité quant aux 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 est en augmentation.

L'écart entre les riches et les pauvres, à l'échelle mondiale, est énorme. Les populations des pays développés, qui représentent seulement 16 % 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. Un milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable, et 500 millions de personnes sur la planète n'ont pas de quoi se nourrir.

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 nombre de pauvres a été estimé à 46 millions de personnes en 2010, soit environ 15 % de la population totale. En Allemagne, près d'une personne sur sept, soit 11,5 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, est l'équivalent de Rockefeller.



Les inégalités en matière de conditions de vie (distribution inégale des revenus et des opportunités entre les populations de notre planète) constituent l'un des problèmes sociaux les plus urgents dans le monde à l'heure actuelle. Comme l'a correctement 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, ou encore dans le « mauvais » pays. » Malheureusement, le changement climatique ne fait qu'exacerber le problème des inégalités sociales et complique la tâche de lutte contre la pauvreté.

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 d'argent et de ressource 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, de s'occuper des malades et des personnes âgées, de nourrir leur famille, de cultiver les terres, et de collecter de l'eau et du carburant. Toutes ces tâches sont sérieusement impactées par le changement climatique.

Dans d'autres régions, y compris des pays à revenu élevé, les enfants en bas âge, les personnes âgées et les personnes handicapées sont particulièrement exposés car leur état de santé dépend fortement des conditions météorologiques.

L'injustice 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 estimations, en 2010, plus de 40 millions de personnes dans le monde ont dû quitter leurs foyers pour des raisons liées au 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 trop fréquentes, aucun des pays de la région (à l'exception des USA et de Cuba) n'ayant la capacité de faire face au durcissement des conditions climatiques.

Fig. 2.10.2. Bidonvilles à Rio de Janeiro (Brésil).

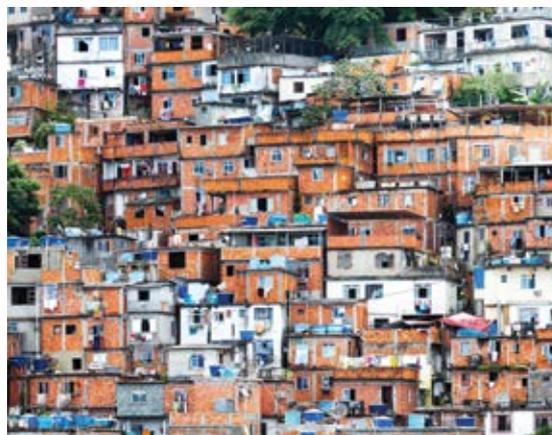


Fig. 2.10.3. Un camp de migrants ayant été contraints de quitter leurs foyers en raison d'une forte sécheresse (Somalie, 2011).



Fig. 2.10.4. Les conséquences de l'ouragan Haiyan (Yolanda) (Philippines, 2013).



L'Australie et la Nouvelle-Zélande ont déjà 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 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.

En 2012, le gouvernement des îles a décidé d'acheter des terres dans la République des Îles Fidji, où les habitants des îles, qui pourraient être englouties par la mer, pourront être réinstallés.

Nouveaux conflits

Le changement climatique peut occasionner de graves conflits entre les populations, notamment sur les questions de droits fonciers, de pénurie d'eau et de migration climatique.

La carte fournie en Fig. 2.10.5 montre les conséquences sociales possibles du changement climatique dans les différentes régions du monde. 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.

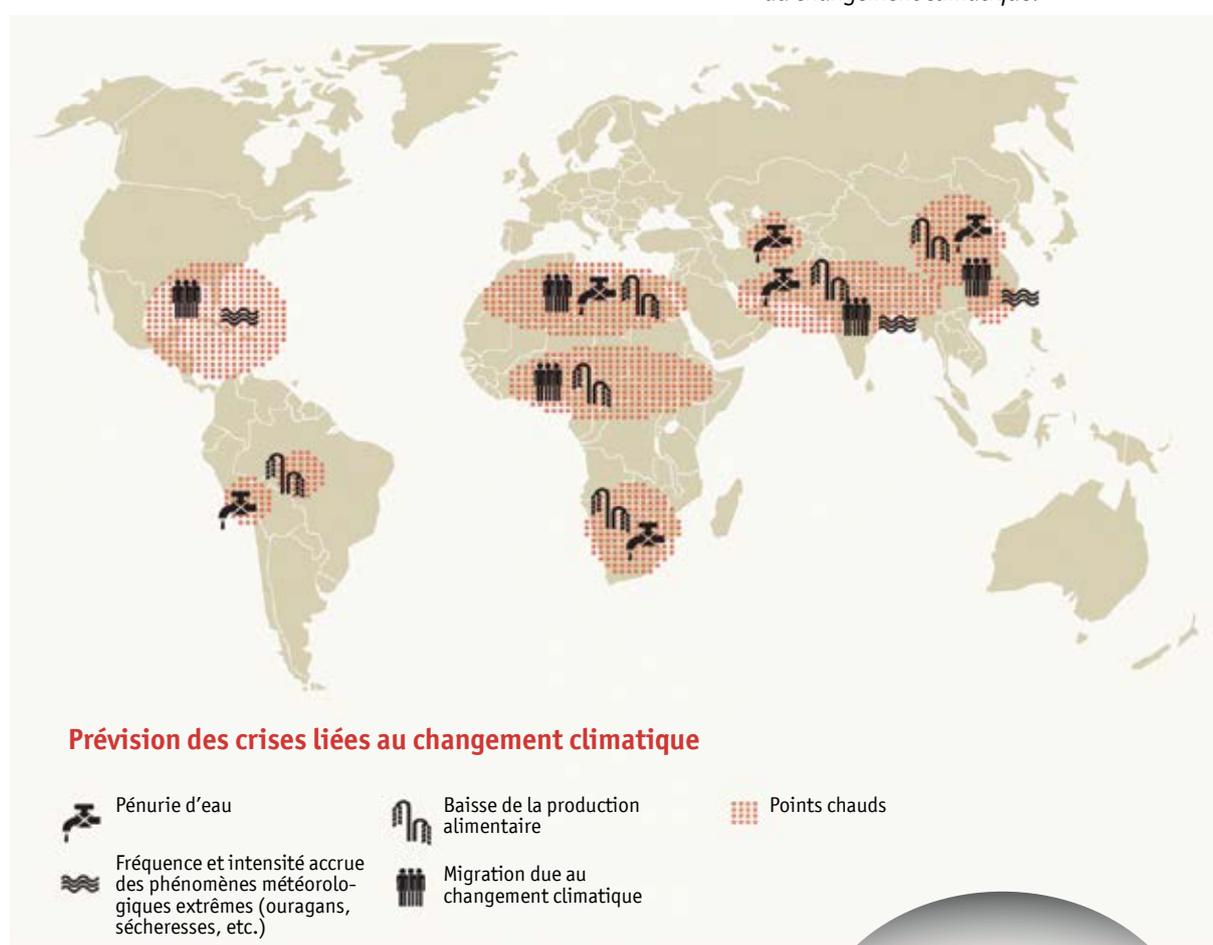
Coopération internationale en matière d'assistance sociale

Des programmes d'assistance spéciaux à destination des groupes les plus vulnérables de la société sont nécessaires pour réduire les risques sociaux liés au changement climatique. Ceux-ci pour-

raient 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.

Fig. 2.10.5. Zones de crises potentielles liées au changement climatique.



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

Exercice 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 leur étant attribuable (données disponibles sur Wikipedia) et coloriez-les en rouge.

Y a-t-il beaucoup de concordances ? 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.

Exercice 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 ?



Comment prévenir les changements climatiques dangereux ?



partie

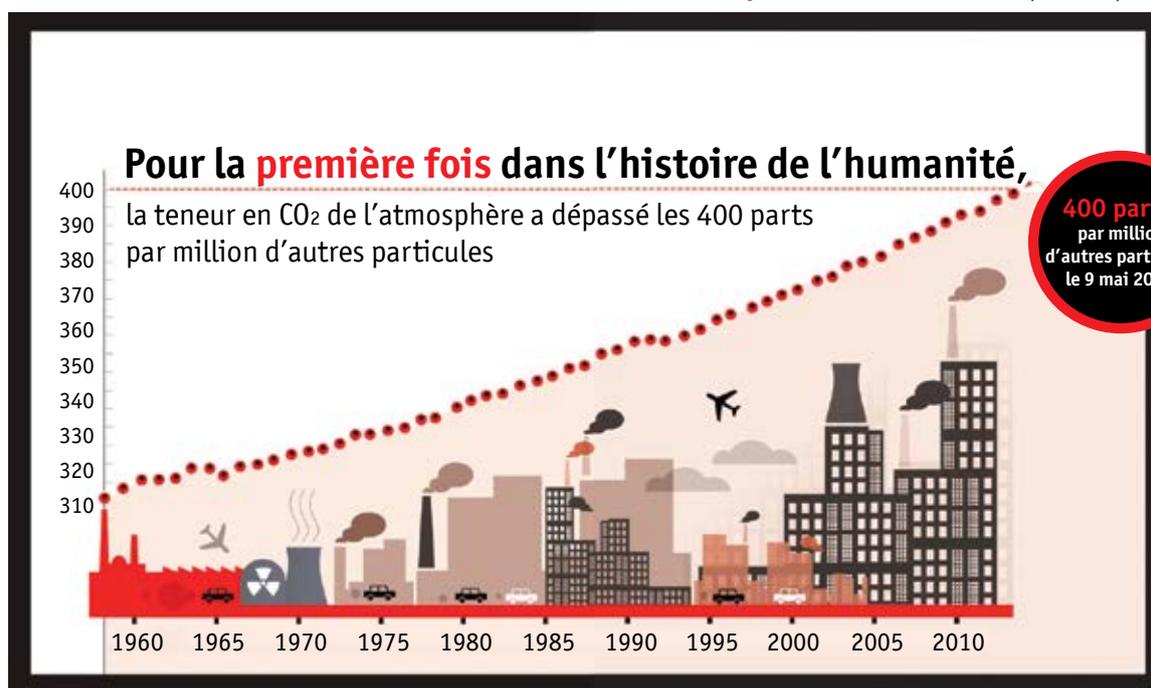
3

3. Comment prévenir les changements climatiques dangereux ?	169
3.1. Les énergies « vertes »	170
3.1.1. Qu'est-ce que l'énergie ?	170
3.1.2. Les principales sources d'énergie	171
3.1.3. Les combustibles fossiles	172
3.1.4. L'énergie nucléaire	176
3.1.5. Les énergies renouvelables	178
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	190
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie	196
3.2.1. Transports respectueux de l'environnement	200
3.2.2. Appareils électroménagers et appareils électriques	205
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs	208
3.2.4. Villes vertes	212
3.3. L'empreinte carbone	217
3.4. Comment puis-je aider la planète ?	
En réduisant votre empreinte carbone	221
3.5. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable	231

3. | Comment prévenir 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 (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 CO₂ par million d'autres particules. En 2013, le niveau de CO₂ contenu dans l'atmosphère a dépassé 400 parts par million pour la première fois en 800 000 ans.

Fig. 3.1.1. Augmentation des concentrations de dioxyde de carbone 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.

Comment l'homme peut-il réduire les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ? Il existe plusieurs manières de le faire.

La première consiste à passer à des sources d'énergie respectueuses du climat. Si nous comparons les différents types de combustibles fossiles, le plus écologique d'entre eux 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.

La seconde façon de réduire les émissions de gaz à effet de serre consiste à diminuer notre consommation énergétique quotidienne, en inventant des machines à faible consommation de carburant et en changeant nos propres habitudes.

La troisième façon consiste à recourir aux plantes pour nous aider. Les plantes absorbent le dioxyde de carbone, par conséquent en réduisant la déforestation et en plantant de nouveaux arbres, les populations pourront réduire la quantité de gaz à effet de serre contenus dans l'atmosphère.

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 des personnes 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 donc vrai que nous prenons à la nature sans jamais rien lui donner en retour ? Bien sûr ! 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 », et 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 « rassemblée ».

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 toute vie sur Terre, en la rendant écologique, florissante et réjouie ? Plus important encore, pouvons-nous commencer à œuvrer pour cette transformation ?

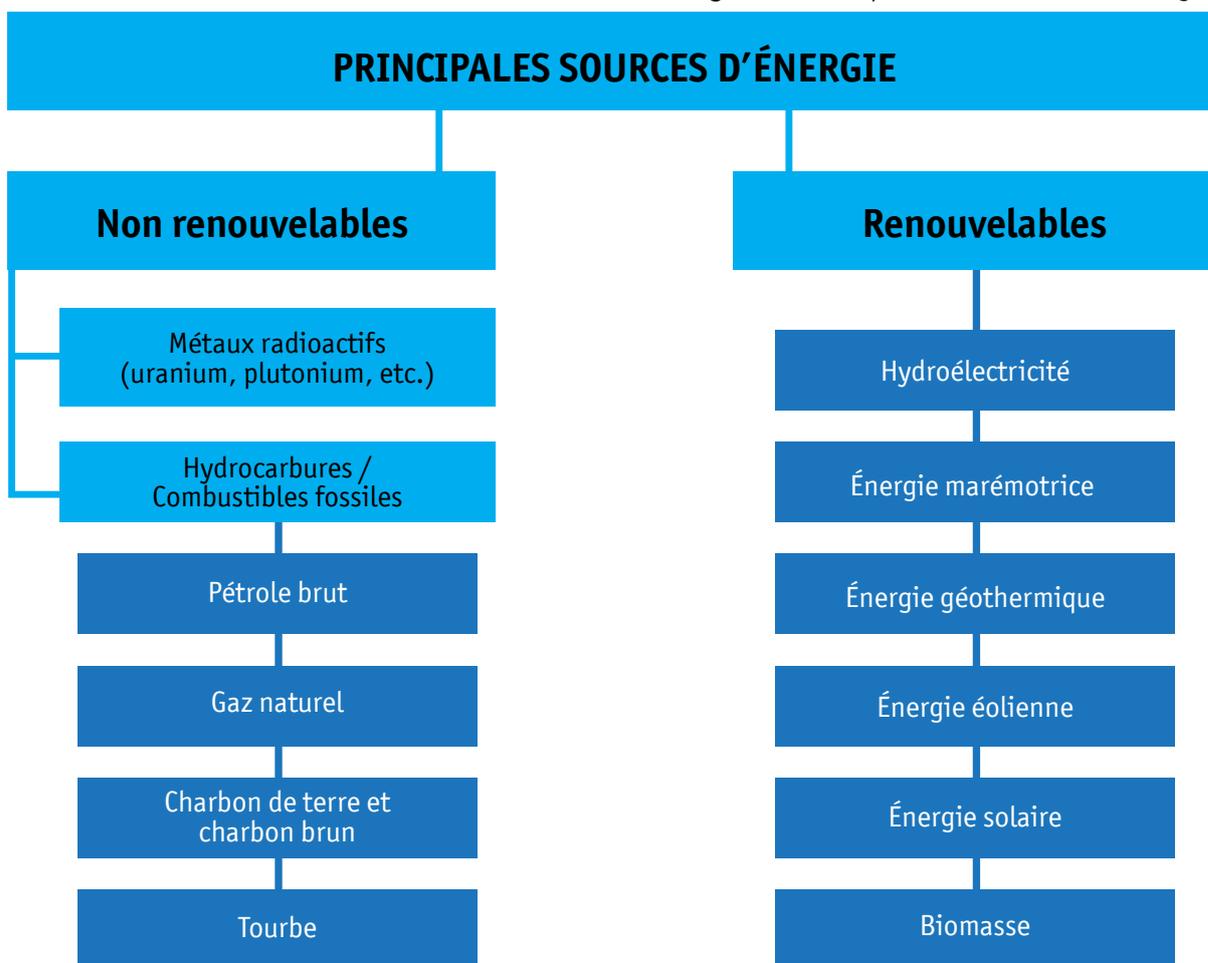
3.1.2. | Les principales sources d'énergie

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 grand nombre d'appareils. TV, ordinateurs et réfrigérateurs, tous fonctionnent à l'électricité, laquelle est raccordée à nos foyers et est le type d'énergie que nous connaissons le mieux. D'où provient-elle ?

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).

Fig. 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.

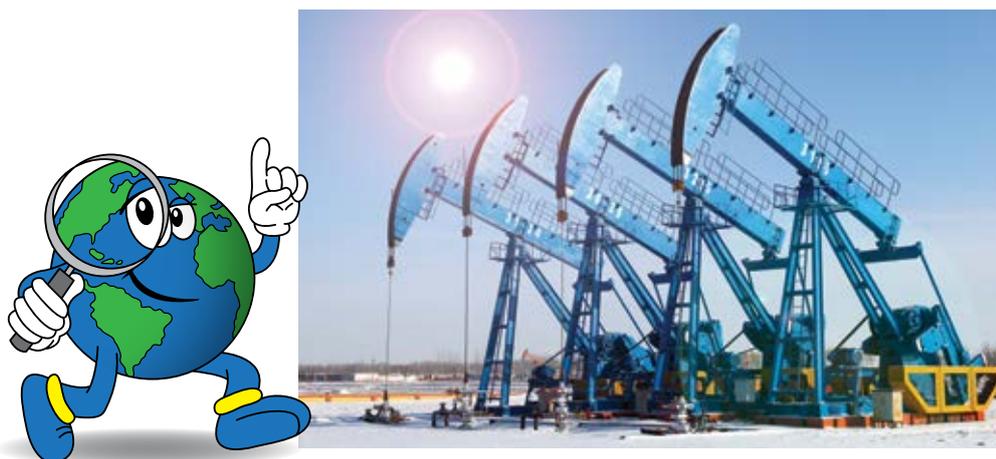
Les sources d'énergies renouvelables puisent leur énergie de processus qui se produisent continuellement dans la nature. Les rayons du soleil, le vent, l'eau, la pluie, les marées et la chaleur provenant de la terre peuvent offrir de grandes quantités d'énergie. De plus, ces ressources sont quasiment 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.

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.

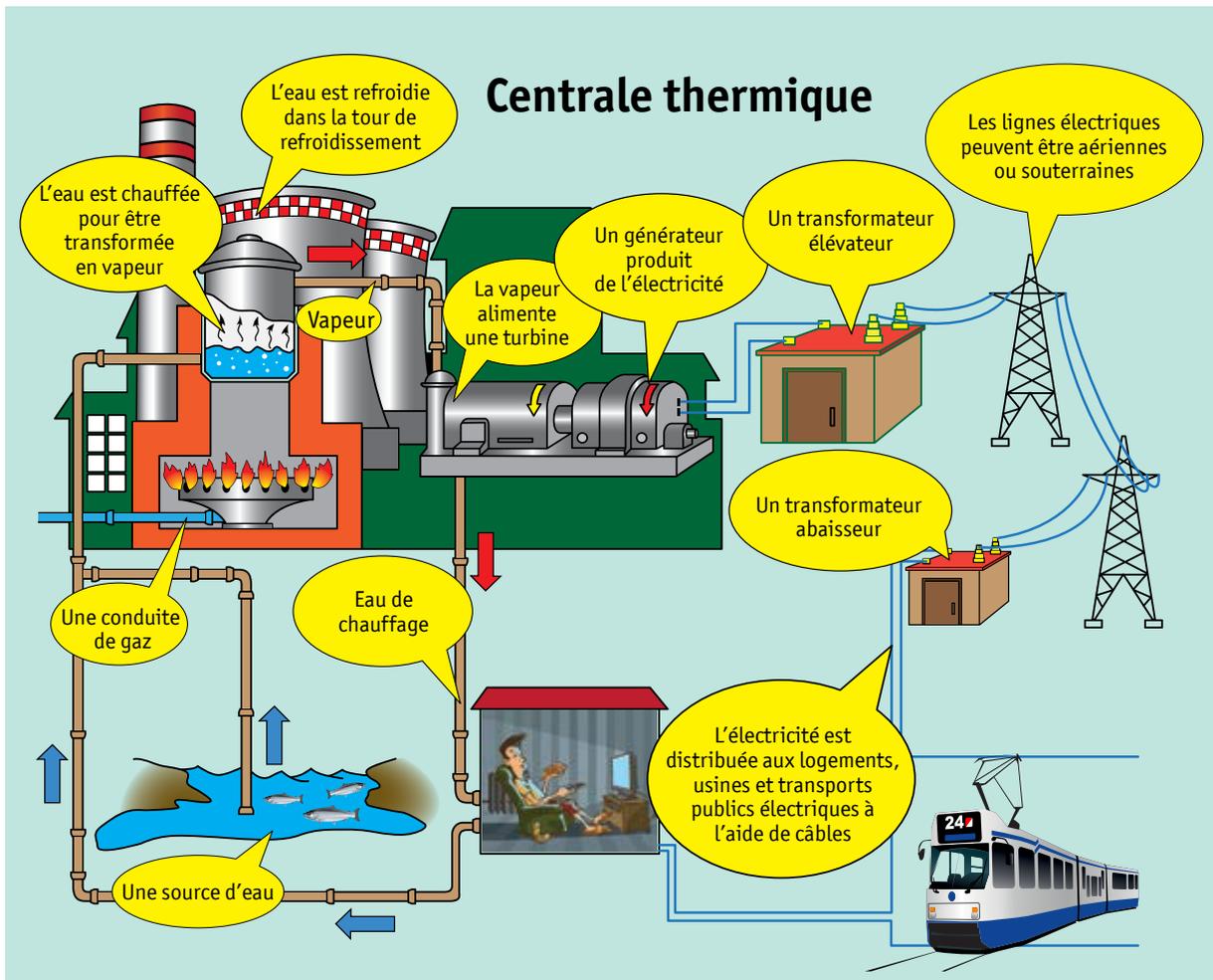
Les combustibles fossiles sont l'héritage d'êtres vivants qui sont apparus sur Terre avant nous, et nous devrions les utiliser avec parcimonie et gratitude. Nous devons garder à l'esprit qu'aucun héritage n'est inépuisable. Si nous les utilisons sans réfléchir, il ne restera plus rien pour nos enfants.

La combustion d'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. 3.1.3).



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.

Fig. 3.1.3. 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.

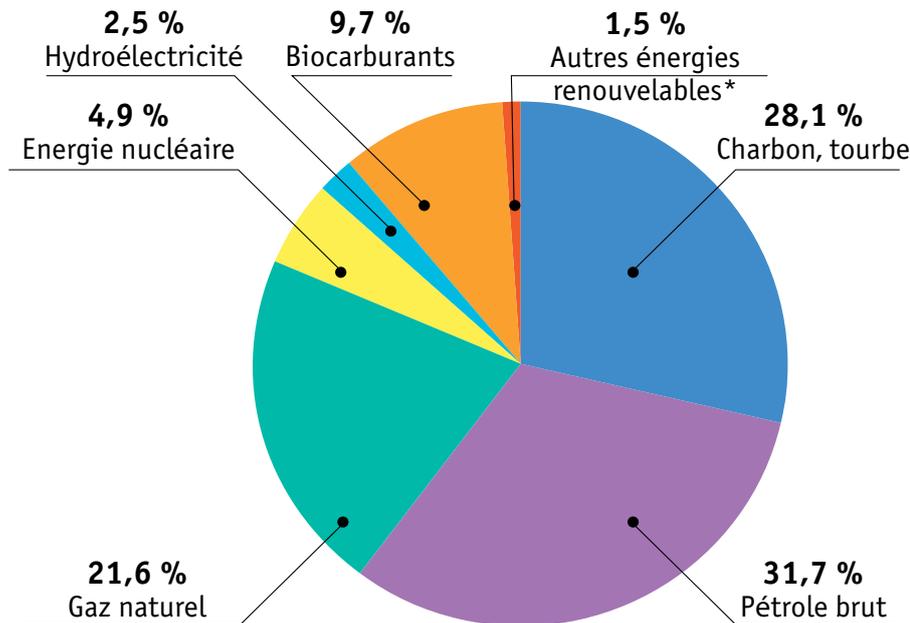
Il est parfois impossible d'acheminer de l'eau chaude vers des ensembles résidentiels depuis une centrale de cogénération. Dans ce cas, une chaufferie est construite, laquelle utilise du combustible pour chauffer l'eau destinée aux systèmes de chauffage des bâtiments locaux.

L'utilisation de combustibles hydrocarbures n'est devenue courante qu'assez récemment, au début de la révolution industrielle. Pendant plusieurs milliers d'années, avant que le bois, l'énergie solaire, le vent et l'eau soient les sources d'énergie les plus communes, les combustibles fossiles ont été utilisés à certains endroits.

Aujourd'hui, les combustibles fossiles représentent 81,4 % de toute l'énergie consommée dans le monde et l'utilisation de combustibles fossiles se répartit comme suit : 31,7 % pour le pétrole, 28,1 % pour le charbon et 21,6 % pour le gaz naturel (Fig. 3.1.4).



Fig. 3.1.4. Consommation mondiale des divers types d'énergie en 2017.



* Autres sources d'énergie renouvelables : éolienne, solaire, géothermique, chaleur à basse température, etc.

Il y a deux inconvénients majeurs à utiliser des combustibles hydrocarbures. 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, qui peuvent être dangereux pour le climat, l'environnement et la santé humaine.

Nous avons vu que les gaz à effet de serre en tant que tels ne sont pas dangereux pour notre santé, toutefois leur accumulation dans l'atmosphère augmente l'effet de serre, ce qui entraîne une hausse de la température mondiale ainsi que d'autres changements climatiques.

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 XIXe 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 XIXe siècle, après que le chimiste américain Benjamin Silliman a découvert que le 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 XXe 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.

Fig. 3.1.5. Émissions de gaz à effet de serre issus de l'utilisation de divers hydrocarbures.

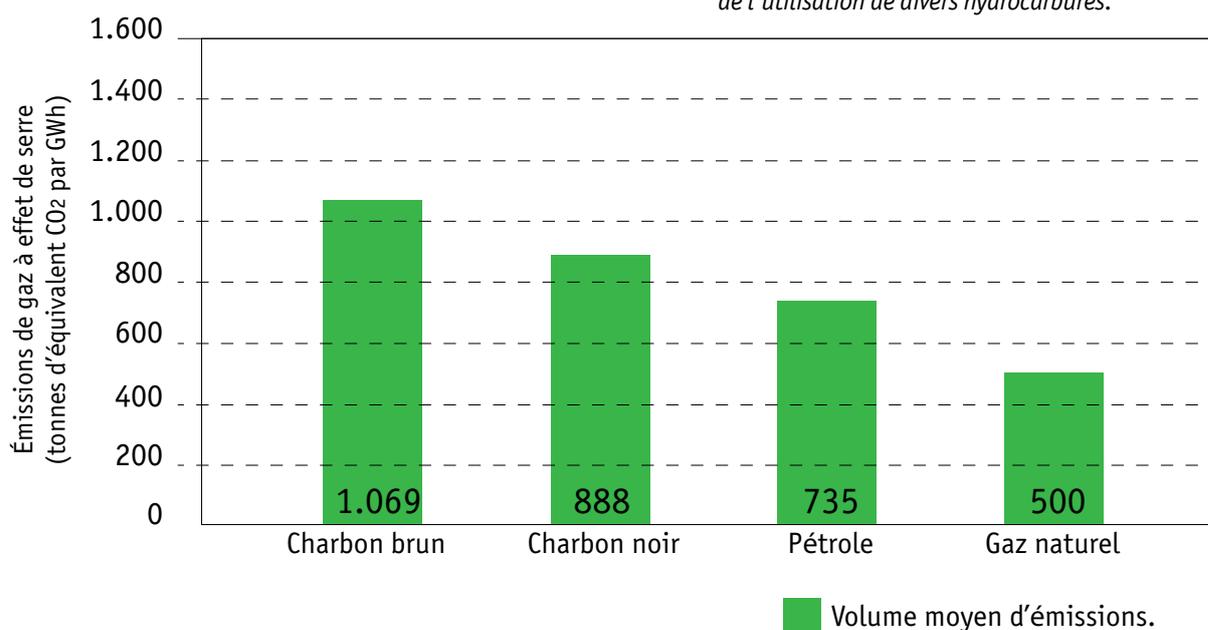


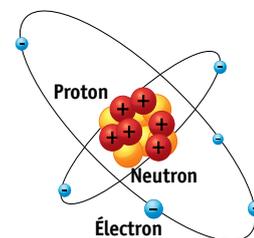
Tableau 3.1.

Émissions 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
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 ?

Au fil du temps, les scientifiques ont examiné plus attentivement la structure de la matière. Tout d'abord, il a été établi que toutes les substances étaient composées de nombreuses particules semblables, appelées molécules. On a ensuite découvert que les molécules elles-mêmes étaient composées d'un ensemble d'atomes. Les différents types d'atomes ont reçu le nom d'« éléments chimiques ». Ils ont été numérotés et répertoriés dans un tableau : le tableau périodique des éléments 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, fait 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. Les niveaux de radioactivité naturelle varient de 5 à 20 micro-roentgens par heure dans différentes régions du monde. 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 américains 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 qu'un tel accident s'était produit 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. On parle donc de « déchets radioactifs ». Les scientifiques sont conscients du problème et réfléchissent sérieusement aux différents moyens d'éliminer ces déchets. Si ces méthodes avaient parfaitement fonctionné, tel qu'initialement prévu, on aurait effectivement pu dire que l'énergie nucléaire était entièrement sans danger. Mais les choses ne sont pas si simples.



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) sont devenues impropres 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.

3.1.5. | Les énergies renouvelables

Comme nous l'avons déjà vu, les énergies renouvelables utilisent des ressources et processus 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.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, environ 20 % de la production mondiale d'énergie électrique est issue de sources renouvelables. Les experts ont élaboré divers scénarios pour le développement de l'énergie renouvelables à l'avenir. Selon le scénario le plus favorable, jusqu'à 60 % de l'ensemble de l'électricité peut être produite à partir de sources renouvelables respectueuses du climat d'ici 2050.

Fig. 3.1.6. Usine produisant du biocarburant à partir de biomasse.



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 : unité de mesure de la puissance d'un appareil, soit le volume de travail que l'appareil est capable de produire pendant une durée déterminée.

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 mégawatt (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 térawatt (TW, 1 000 GW) : la puissance de crête de la foudre. L'énergie électrique totale produite par l'homme en 2011 a été de 22 000 térawatts.

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. 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.

L'énergie solaire après le coucher du soleil ?

La centrale de Solana se situe à environ 100 km au sud-est de la ville de Phoenix, Arizona, aux USA. Elle peut produire jusqu'à 280 MW d'électricité grâce au rayonnement solaire et est l'une des centrales solaires les plus puissantes au monde à utiliser la technologie du miroir parabolique. Mais ce qui rend ce complexe si spécial ce n'est pas sa taille, mais sa capacité à continuer à générer de l'électricité pendant 6 heures après le coucher du soleil grâce à des réservoirs spéciaux capables de conserver la chaleur. C'est un avantage non négligeable étant donné que les périodes de pics de consommation électrique interviennent, dans la région, après le coucher du soleil.



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 leaders dans ce domaine sont l'Espagne, l'Italie, la France, les USA et la Chine.

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 populaire 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 sont utilisées pour la construction des éoliennes installées sur plateformes flottantes.



Le parc éolien offshore le plus grand du monde

Le parc éolien offshore le plus grand du monde, baptisé Walney Extension, est entré en exploitation en 2018. Ce parc éolien se situe à 14 km à l'ouest de l'île de Walney dans la mer d'Irlande, au Royaume-Uni. Le parc possède une capacité totale de 659 MW et est composé de 87 éoliennes. Le parc éolien a supplanté un autre site britannique, le London Array ouvert en 2013, le reléguant à la deuxième place au classement des parcs éoliens les plus grands du monde. Le parc London Array possède 175 éoliennes et une capacité de 630 MW.



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.

L'énergie éolienne ne produit actuellement que 2,3 % de l'électricité consommée dans le monde, mais est une source d'énergie qui se développe rapidement, à mesure que de nouvelles technologies, plus avancées, sont inventées pour lui permettre de fonctionner de manière plus efficace. Les experts de l'Agence internationale de l'énergie estiment que l'énergie solaire et l'énergie éolienne pourraient produire, ensemble, jusqu'à 18 % de l'électricité mondiale d'ici 2035.



L'énergie éolienne joue déjà un rôle important dans certains pays européens. Au Danemark, par exemple, les éoliennes produisent plus de 40 % de l'électricité.

Fig. 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 utilisée 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 170 000 morts.

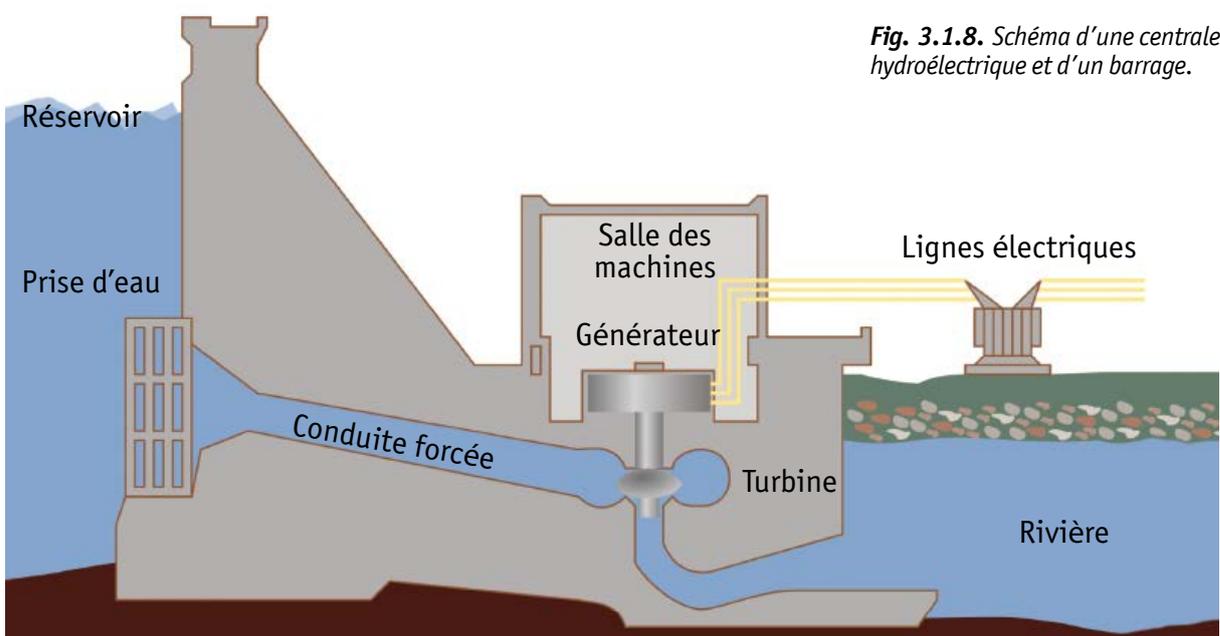


Fig. 3.1.8. Schéma d'une centrale hydroélectrique et d'un barrage.

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, Cameroun et Brésil).

La Chine est fortement engagée dans l'hydroélectricité énergie : 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 grande, baptisée Grand Inga, d'une capacité de 39 GW doit être construite sur le fleuve Congo, en République démocratique du Congo, Afrique.

Fig. 3.1.9. Petite centrale hydroélectrique sur la rivière Kokra (Slovénie).



Fig. 3.1.10. Centrale hydroélectrique des Trois-Gorges (Chine).



Fig. 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.

Le 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 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. La première centrale houlomotrice a été officiellement ouverte en 2008 dans la région de Aguçadoura au Portugal, à une distance de 5 km de la côte. La centrale possède une capacité de 2,25 MW.

En 2013, une société russe a présenté le premier projet russe de création d'un système de production d'électricité reposant sur l'énergie houlomotrice. Le système s'adresse à la consommation de masse.



La centrale marémotrice la plus grande du monde se situe en France, à l'embouchure de la Rance. Il s'agissait également de la première centrale marémotrice du monde au moment de sa construction en 1967. La différence de niveau entre la marée haute et la marée basse dans cette partie de la France est en moyenne de 8 m et peut aller jusqu'à 12 m. La centrale possède 24 générateurs d'un diamètre de 5,35 m et d'un poids de 470 tonnes chacun, capables de produire 240 MW d'énergie au total.

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 étaient 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, via 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.



Fig. 3.1.12. Conduite d'une centrale géothermique.

L'ensemble de centrales géothermiques le plus puissant et le plus réputé se trouve au nord de San Francisco, aux États-Unis. Celui-ci a été baptisé « The Geysers » et compte 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.



Énergie thermique de bas niveau

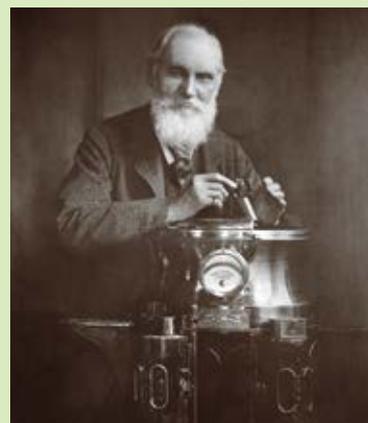
Le principe est le suivant : un agent de refroidissement liquide (le réfrigérant) absorbe la chaleur à l'intérieur du réfrigérateur, à la suite de quoi un compresseur aspire et comprime l'agent de refroidissement sous la pression, à l'extérieur du réfrigérateur, de sorte que (conformément aux lois de 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 chauffés. 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, elle n'est donc pas utilisée comme source d'énergie autonome, mais comme un complément permettant de réduire la consommation de combustibles pour le chauffage.

Le concept de pompe à chaleur a été développé au XIXe siècle par le scientifique britannique William Thomson (Lord Kelvin), et a été amélioré par l'Autrichien Peter Ritter von Rittinger. Cependant, l'application concrète la plus importante des pompes à chaleur n'a été développée que plus tard, soit au XXe siècle. Un inventeur, R. Weber, qui réalisait des expériences sur une armoire de congélation, a touché la conduite chaude de l'armoire et s'est demandé comment cette chaleur pourrait être utilisée. Il pensa à utiliser la conduite chaude pour chauffer l'eau, mais cela produisit une eau bien trop chaude, il fabriqua donc un serpentin pour chauffer l'air de la maison. L'inventeur trouva ensuite un moyen de pomper la chaleur du sol. Très rapidement, il put vendre l'ancien brûleur à charbon utilisé par sa famille, car celui-ci n'était plus nécessaire !

Le physicien britannique,
William Thomson (Lord Kelvin).



Biomasse

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. Cependant, le biocarburant peut être aisément remplacé : lorsque nous abattons un vieil arbre pour produire du carburant, nous pouvons en planter un nouveau à sa place, et dans quelques décennies, il donnera naissance à un nouvel arbre. Certaines des plantes et cultures que nous utilisons pour fabriquer des combustibles poussent en un été, voire plus vite.

Réfléchissons un peu : bon nombre d'entre nous se sont déjà réchauffés ou ont déjà partagé de bons moments 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 plantés 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 arrangé 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.



Outre la combustion de fibres végétales pour obtenir directement de l'énergie, les fibres peuvent également être transformées en combustible universel, lequel est plus facile à transporter et à utiliser dans les machines et appareils existants. Les plantes oléagineuses peuvent être utilisées pour produire divers carburants diesel liquides (biodiesel).

Les produits végétaux contenant du saccharose et de l'amidon peuvent être utilisés pour produire de l'alcool (éthanol), également utilisable comme carburant.

La fermentation est une autre façon d'utiliser la biomasse.

Les animaux de ferme, qui ingèrent et digèrent des végétaux, produisent du fumier, lequel peut également être utilisé pour produire de l'énergie. Si le fumier et les déchets alimentaires sont collectés ensemble dans un conteneur fermé, et que celui-ci est chauffé à 50 ou 60 °C, les bactéries décomposeront la matière organique pour produire du gaz méthane, lequel pourra être recueilli et utilisé comme carburant.

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.

Fig. 3.1.13. Usine de bioéthanol au Brésil.



Fig. 3.1.14. 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.



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 ?

Chaque année, le monde produit et utilise ou détruit environ 170 milliards de tonnes de biomasse primaire.



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.

Cela n'a aucun sens de débattre de l'efficacité des technologies et du coût de l'énergie sans les mettre en perspective avec les questions du changement climatique, de l'environnement et de la santé. Par conséquent, avant de prendre quelque décision que ce soit quant au type de centrales à construire et à exploiter, un certain nombre de points (techniques, économiques, environnementaux, etc.) sont à prendre en compte. Récapitulons et comparons une nouvelle fois les avantages et les inconvénients des principales sources naturelles d'énergie.

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 géographie 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.*

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. Il peut être transporté en toute sécurité dans des wagons découverts, puisqu'il n'est pas explosif.



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 m³ 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 CO₂ 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 CO₂.

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 restent 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 pales.

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 CO₂ 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 entrepreneurs 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 (force du vent, présence de cours d'eau, nombre de jours d'ensoleillement), et aucun calcul universel ne peut être appliqué une fois pour toutes à leur fonctionnement. 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. Néanmoins, les nouvelles technologies permettent progressivement de rendre la production d'énergie à partir de sources renouvelables plus efficaces et de réduire les coûts de production de ce type d'énergie.

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'énergie 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 ?



Exercices

Exercice 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.

L'expérience. Couvrez la table à l'aide d'une couverture afin qu'aucune lumière ne puisse pénétrer dans la petite « maison » que vous avez construite sous la table. Prenez la bouteille d'eau et entrez dans la petite maison. Placez la bouteille dans l'espace entre les couvertures. Vous disposez désormais d'une lumière pour éclairer votre sombre maison. Une règle en plastique transparent, placée entre les paumes de vos mains, produirait le même effet.

Exercice 2. 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.

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.

Fig. 3.2.1. Comparaison de l'efficacité énergétique de différentes ampoules.



L'efficacité énergétique est le ratio entre la quantité d'énergie consommée et l'énergie utile produite.

L'économie d'énergie regroupe l'ensemble des mesures prises afin de réduire la quantité d'énergie consommée et d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables.

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.

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 cents 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 CO₂ par an, et si le chargeur de téléphone est branché en permanence (sans être utilisé), alors on parle de 2,4 kg de CO₂ émis.

Émissions de CO₂ 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).



L'industrie informatique est responsable d'environ 2 à 2,5 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone, la plus grosse part de ces émissions étant attribuée aux PC et moniteurs (collectivement 40 % de l'ensemble des émissions émanant de l'industrie informatique).

Certains d'entre vous n'ont probablement pas encore 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. Si l'essor de l'industrie informatique se poursuit au rythme actuel, d'ici 2020 la pollution résultant de l'ensemble des systèmes informatiques de notre planète sera supérieure aux émissions des avions. 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. 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.

Premièrement, il faut trouver le temps de se familiariser avec la nouvelle 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 remboursés par le bénéfice tiré, 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 technologies 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 d'autrui.

L'efficacité énergétique et l'économie d'énergie sont très importantes. Pour les ménages, elles signifient 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 une réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

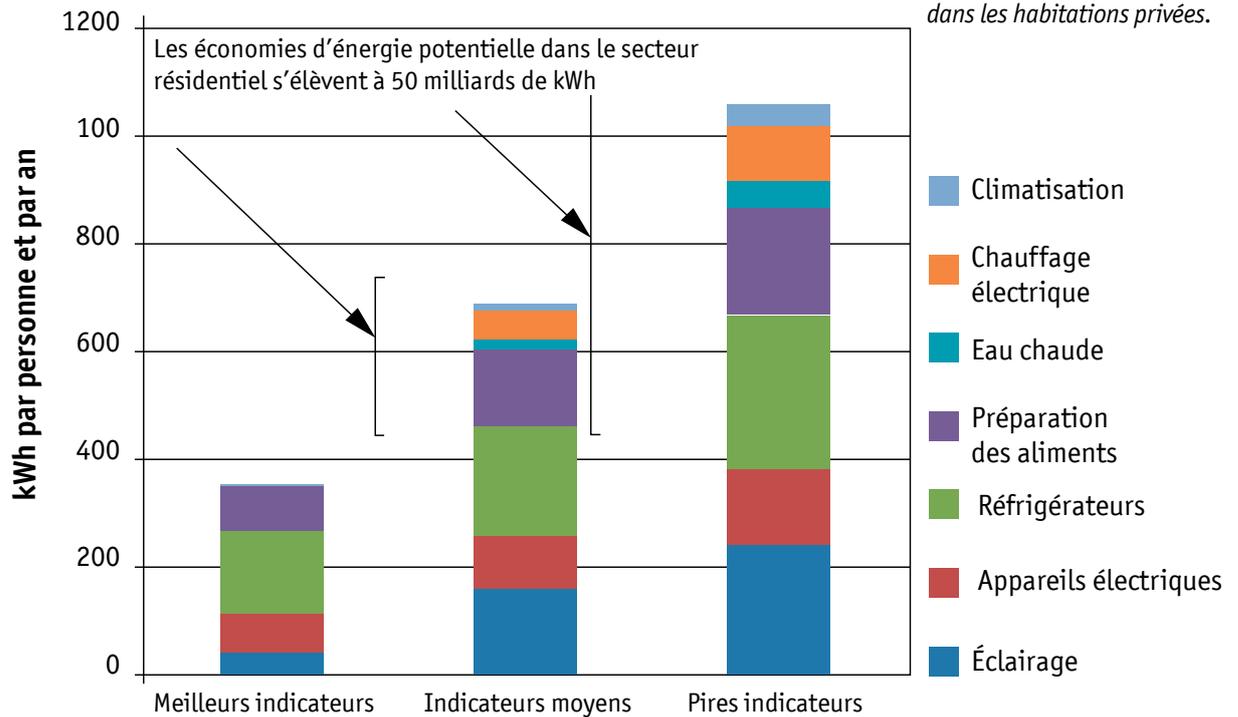
Chaque personne en Russie consomme environ 2 kWh chaque jour en moyenne. Un citoyen économe s'en sort avec 1 kWh, tandis qu'un utilisateur plus enclin au gaspillage énergétique peut consommer jusqu'à 3 kWh par jour.

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.

Il faut en moyenne 800 g de CO₂ pour produire 1 kWh d'électricité. Les émissions produites 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂. Par conséquent, les économies annuelles de CO₂ de trois personnes passant de consommateurs « moyens » à consommateurs « économes » s'élèvent à 3 tonnes.

Fig. 3.2.2. Économies d'énergie potentielles dans les habitations privées.



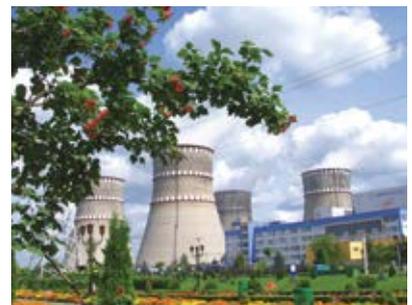
Centrale thermique au charbon.



Centrale thermique au gaz naturel.



Centrale nucléaire.



3.2.1. | Transports respectueux de l'environnement

Les moyens de transport, de la voiture à l'avion, égalent les centrales électriques en matière de consommation intensive de combustibles fossiles. 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 13,5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, et les véhicules automobiles sont responsables à eux seuls de 10 % de ces émissions.

La grande majorité des voitures fonctionnent au pétrole. Une voiture récente consomme environ 200 litres d'oxygène par litre d'essence. Ce chiffre est nettement supérieur à la quantité d'oxygène inhalée chaque jour par une personne. En moyenne, une voiture parcourant 15 000 km par an consomme 1,5 à 2 tonnes de carburant et 20 à 30 tonnes d'oxygène.

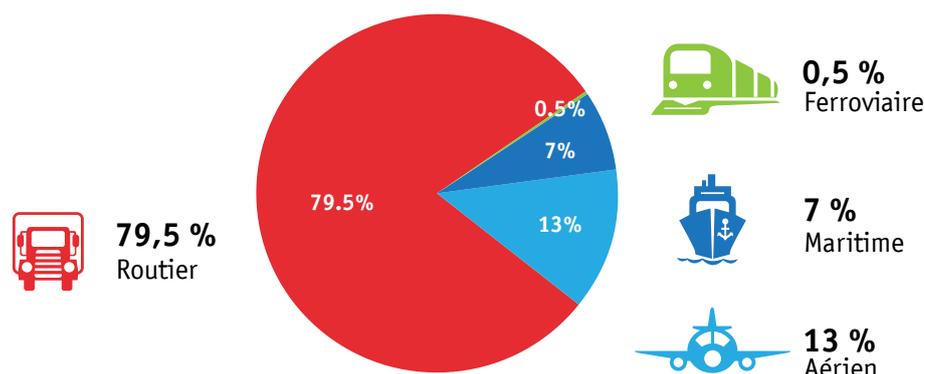
Les moteurs à combustion interne servant à propulser les véhicules rejettent des gaz d'échappement dans l'atmosphère contenant de l'azote, de la vapeur d'eau, du dioxyde de carbone (entre 1 et 12 % du volume d'émissions), ainsi que des composés toxiques et même cancérigènes (suie et benzopyrène).

Les émissions de CO₂ 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, tandis que les voitures sont responsables de près de 80 % des émissions de gaz à effet de serre imputables aux transports (Fig. 3.2.3).

Fig. 3.2.3. Ventilation des émissions de gaz à effet de serre par mode de transport.

Ventilation des émissions de gaz à effet de serre par mode de transport



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. Le meilleur outil pour le faire à l'heure actuelle est l'application Skype, qui vous permet de communiquer avec vos amis partout dans le monde où il y a accès à Internet.

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 train français AGV (automotrice à grande vitesse) est composé de wagons qui disposent chacun de leur propre motorisation, ce qui permet une amélioration de l'efficacité énergétique de 20 %.

Le train à grande vitesse japonais, appelé Shinkansen (Fig. 3.2.4), 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.

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 avaient été relégués depuis plus de 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, certaines 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 CO₂ de tous les vols et invitent les passagers à les compenser. Par exemple, un vol long courrier Berlin - San Francisco opéré par Lufthansa produit 1,44 tonnes d'émissions de CO₂ 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. 3.2.6).

Fig. 3.2.4. Le train à grande vitesse japonais « Shinkansen », économe en énergie.



Fig. 3.2.5. 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.



Fig. 3.2.6. Calcul des émissions de CO₂ et de la compensation pertinente pour un vol aller-retour Berlin - San Francisco en classe économique avec Lufthansa.

In cooperation with **Lufthansa**
Nonstop you

Your flight:
From: Berlin (DE), SXF to: San Francisco (US), SFO, Roundtrip, Economy Class, ca. 18,300 km, 1 traveler

CO₂ amount: 1.440 t

Portfolio: lufthansa
Your contribution to carbon compensation: EUR 29.00
This will support the two climate protection projects
"Solar Lighting in rural Ethiopia" and
"Energy-efficient Cook Stoves for Siaya Communities, Kenya".

[→ Compensate](#)

Si vos parents envisagent d'acheter une voiture, parlez-leur de l'efficacité énergétique des véhicules automobiles. 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 automobiles 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 moindres.

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 voitures 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.

Fig. 3.2.7. 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.*
- *Entretien 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 pression 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.*

Un véhicule électrique récent.



Aujourd'hui, les principaux constructeurs automobiles, de Toyota à Audi, en passant par Ferrari et Rolls Royce, s'attachent à concevoir des véhicules écologiques. 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.

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. Le passage des transports publics à un moteur 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 signalées 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.

Fig. 3.2.8. 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 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.



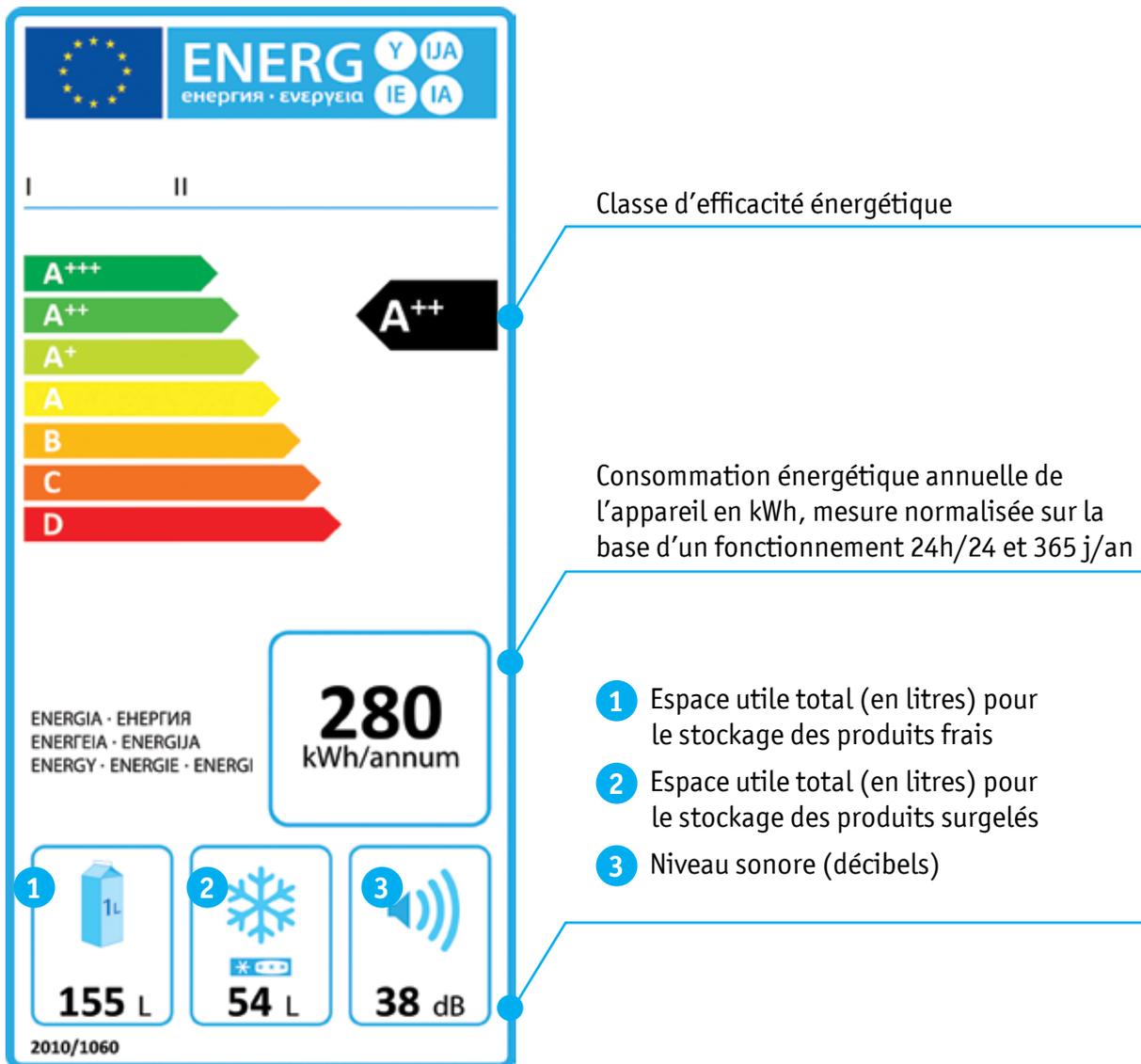
3.2.2. | Appareils électroménagers et appareils électriques

De nombreux pays disposent d'un système particulier d'étiquetage des appareils électroménagers 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. 3.2.9).

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, A+, A++ et A+++.

Fig. 3.2.9. 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, initié 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).

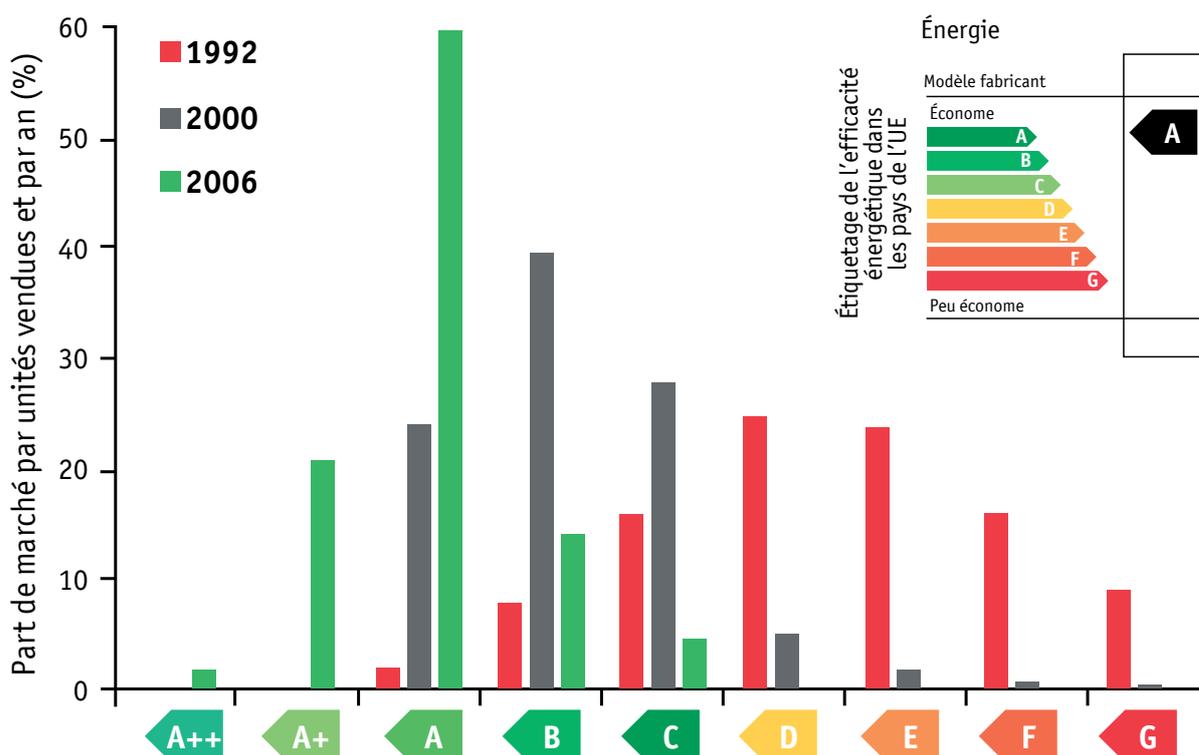
En 2002, le programme Energy Star a permis aux Américains de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 53,5 millions de tonnes de CO₂ (soit l'équivalent annuel de 14 millions de voitures) et d'économiser 5,3 mégawatts d'électricité, soit 7 milliards de dollars américains au total. En 2012, la réduction des gaz à effet de serre due au programme Energy Star s'est établie à 254,7 millions de tonnes.

Fig. 3.2.10. Le label américain Energy Star.



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. 3.2.11).

Fig. 3.2.11. 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 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 technologies avec prudence : sans préjugé, 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 éco-énergétique 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. 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.



Pour en revenir à l'époque actuelle, 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.

Fig. 3.2.12. 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.



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.

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 !



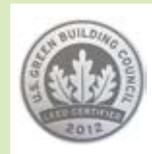
Certificats environnementaux pour les bâtiments

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 programme de certification environnementale LEED a été conçu en 1998 sur la base de six groupes de critères : 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.



Une 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 canalisé avec l'air entrant provenant de l'extérieur dans un échangeur thermique spécial, de sorte que l'air chaud transfère sa chaleur à l'air froid.

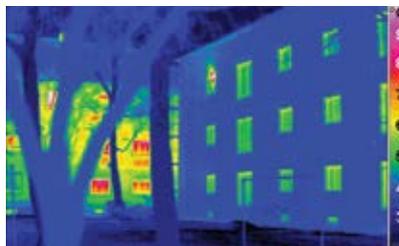
En été, l'air chaud de l'extérieur est canalisé dans le sol, où il se rafraîchit. Des principes similaires sont employés pour récupérer la chaleur des eaux usées. Bien sûr, même des bâtiments aussi bien pensés nécessitent parfois une source de chauffage ou de climatisation supplémentaire, mais il faudra 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 sont mis en œuvre à plus grande échelle. En 2006, un total de 6 000 immeubles de bureaux, boutiques, écoles et crèches, tous passifs, ont été construits dans le monde (notamment en Europe). Une directive européenne appelle l'ensemble des nouvelles constructions à être quasiment neutres en énergie d'ici à 2020.

Fig. 3.2.13. 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 un célèbre complexe immobilier à Londres, au Royaume-Uni, qui intègre 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 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 publics,
- bois provenant de sources légales et durables,
- plus de 90 % des déchets de construction recyclés.

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. Cependant, il favorise 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.

El primer edificio de ahorro energético activo del mundo se construyó en Dinamarca y este país incluso tiene un portal de Internet para edificios activos: www.activehouse.info.

Habitation active au Danemark

« Home for Life' » au Danemark constitue un exemple d'habitation active neutre en CO₂. Il produit 9 kWh/m² d'énergie par an, soit plus qu'il 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 CO₂ 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 produite 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 doigts, cependant ce rêve devient petit à petit une réalité partout dans le monde.

Sams (Danemark)

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. 10 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 gigawatts-heures 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 km², 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, mais se qualifie fièrement de ville.



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 et devrait s'achever dans un futur proche. 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 automatisés. 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).



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. Aujourd'hui, Treasure Island fait office de centre d'essai pour les constructions écologiques. Il est prévu que 13 500 personnes s'y installent, lesquelles produiront leur propre électricité à l'aide de panneaux solaires, qui seront installés sur 70 % des toits des immeubles d'ici 2020, produisant ainsi jusqu'à 30 gigawatts-heures d'électricité par an. De l'électricité sera également produite grâce à l'énergie éolienne. Les habitants pourront acheter des fruits et des légumes auprès d'une ferme organique implantée sur l'île, tous les véhicules seront respectueux de l'environnement et tous les bâtiments seront économes en énergie. Les bâtiments construits sur l'île sont certifiés par le programme d'efficacité énergétique LEED.



Sherford (Angleterre)

Sherford en Angleterre est une nouvelle ville écologique de style anglais traditionnel. Le projet devrait prendre fin en 2020 et bénéficie du soutien du Prince Charles. 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.



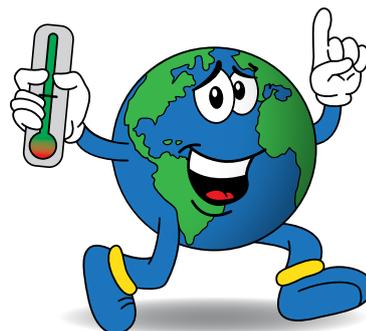
Sherford sera aménagée de manière à faciliter les déplacements rapides à pied et en vélo, de sorte que ses habitants n'auront nullement besoin de transports motorisés dans certaines parties de la ville. Des espaces seront aménagés sur les toits pour l'installation de panneaux solaires et de potagers.

La ville de Vancouver (Canada)

La ville de Vancouver (Canada) est reconnue comme l'une des villes les plus respectueuses de l'environnement d'Amérique du Nord. Comme prochaine étape, la ville a adopté un plan ambitieux afin 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 % d'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 américains, 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-ils 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

Exercice 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 électroménager. 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.

Exercice 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.

Exercice 3.

Renseignez-vous sur les initiatives écologiques des différentes villes du monde en consultant la page « Sustainable cities » 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

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 en raison des qu'elles consomment directement ou indirectement.



Le dioxyde de carbone est à l'origine de 75 % des émissions de gaz à effet de serre associées à l'activité humaine. Toutes nos actions ont une incidence sur le climat.

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.

Il est pratique courante de traduire toutes les émissions de gaz à effet de serre en équivalent CO₂ afin de faciliter la compréhension et les calculs. Cette quantité est exprimée en unités d'équivalent CO₂.

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 CO₂ 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 influencer : 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 la taille 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 CO₂. 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 CO₂. L'empreinte carbone d'une pomme importée (par exemple, une importée d'Italie) s'élèvera à 150 g de CO₂.

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.



Exemples de labels « carbone neutre ».



Questions

11. Qu'est-ce qu'une empreinte carbone ?
2. Quelles sont les unités utilisées pour mesurer une empreinte carbone ?
3. Lequel des fruits à la plus grosse empreinte carbone : des fraises issues du jardin d'une ferme locale ou des fraises achetées à l'étranger et joliment emballées ? Pourquoi ?



Exercices

Exercice 1. Test : « Mon empreinte carbone »

- A.** Lorsque vous achetez des fruits et des légumes en magasin, que choisissez-vous généralement :
- produit local, non emballé (1 point) ;
 - produit non emballé provenant des régions du sud de votre pays (2 points) ;
 - produit non emballé provenant de France, des Pays-Bas, d'Argentine et d'autres pays (3 points) ;
 - produit importé, préemballé individuellement (4 points) ?
- B.** Le sac que vous utilisez pour vos courses est :
- en lin ou en coton (1 point) ;
 - en papier (2 points) ;
 - un sac en plastique que je prends chez moi (3 points) ;
 - un sac en plastique que je prends ou achète en magasin au moment de l'achat des produits (4 points).
- C.** Lorsque vous achetez des boissons, quel est leur conditionnement ?
- en carton (1 point) ;
 - en verre (2 points) ;
 - en aluminium (3 points) ;
 - en plastique (4 points) ?
- D.** Quel type de livre préférez-vous lire :
- un nouveau livre, acheté en boutique (4 points) ;
 - un livre électronique (3 points) ;
 - un livre que j'ai déjà lu (2 points) ;
 - un livre de la bibliothèque (1 point) ?
- E.** Lorsque vous offrez un cadeau à quelqu'un, préférez-vous :
- un papier d'emballage brillant et attrayant, quel que soit le matériau dans lequel il est fabriqué (4 points) ;
 - un emballage en papier portant un label écologique pour montrer que celui-ci est recyclable (2 points) ;
 - une boîte ou un sac usagé(e) que je décore pour l'occasion (2 points) ;
 - offrir le cadeau sans aucun emballage (1 point) ?

Réponses au test « Mon empreinte carbone » :
De 5 à 7 points : Super ! L'empreinte carbone d'une souris ! Vous pouvez être fier de vous ;
De 8 à 10 points : L'empreinte carbone d'une patte de chat ! Ne restez pas là à vous prélasser pour autant, vous pouvez faire encore mieux.
De 11 à 13 points : L'empreinte carbone d'un sabot de cheval ! Mettez votre harnais et réduisez un peu votre consommation d'énergie.
De 14 à 16 points : L'empreinte carbone d'un éléphant ! Vous feriez mieux de mettre tout ce poids au profit de l'économie d'énergie.

3.4. | 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. 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.

Fig. 3.4.1. 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. La seule solution (hors démolition) est une rénovation complète de la façade en utilisant les enduits calorifuges les plus récents.

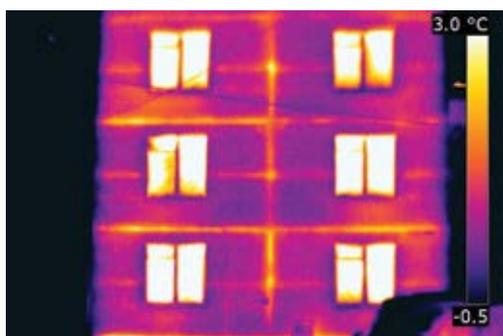
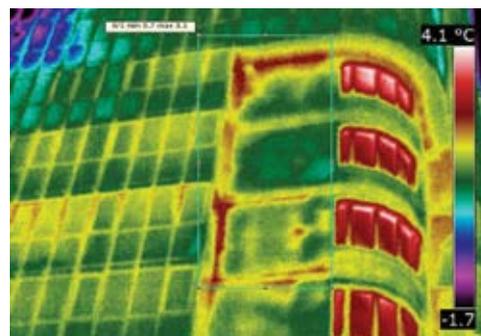


Fig. 3.4.2. Les déperditions de chaleur à l'angle de ce bâtiment en briques sont conséquentes à la jonction entre le vitrage des balcons et le mur, et également à la jonction entre les plafonds et les murs.



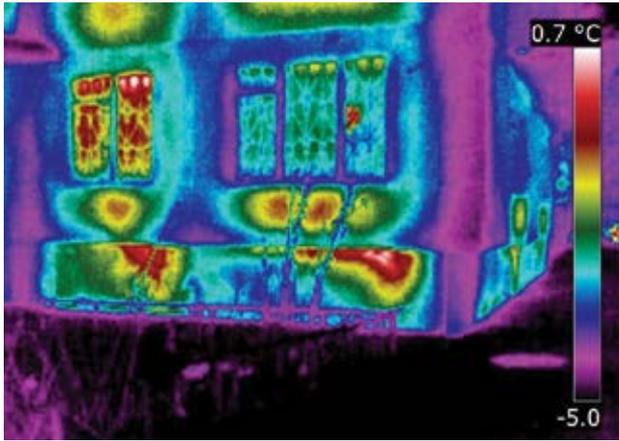
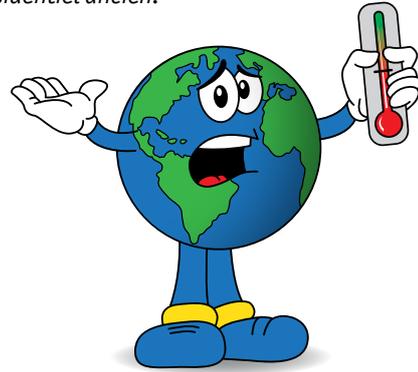


Fig. 3.4.3. Les points rouges correspondent aux emplacements des radiateurs muraux installés dans ce bâtiment résidentiel ancien.



Isolation thermique des appartements

- 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 faire jusqu'à 40 % d'économies d'énergie en utilisant des dispositifs d'éclairage récents.
- 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 important de ne 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 disant 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

- 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



- 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 1h30 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, triezy-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 aurez peut-être besoin que quelque 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 donner 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 – peut-être serez-vous chanceux et disposerez-vous 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 parlez 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 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.

Ballots de déchets métalliques.



Cuadro 3.4.1. 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 à partir de matériaux recyclés	Économie
Bois	3 tonnes	0 tonne	3 tonnes
Énergie	11 140 kilowatts-heure	6 450 kilowatts-heure	4 690 kilowatts-heure
Émissions de gaz à effet de serre	2 581 kg de CO ₂	1 625 kg de CO ₂	956 kg de 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 CO₂, et la copie d'une seule feuille A4 produit 380 g de CO₂.

Économies d'énergie en matière de production grâce à l'utilisation de matériaux recyclés

Aluminium – 95 %

Zinc – 60–70 %

Papier – 64 %

Cuivre – 70–85 %

Magnésium – 95 %

Plastique – 80–88 %

Plomb – 60–80 %

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.



Fig. 3.4.4. Le changement climatique. Comment réduire votre empreinte carbone.

Changement climatique

Comment réduire votre empreinte carbone

À L'ÉCOLE
 Accrochez cette affiche au mur dans votre école.
 Communiquez ces recommandations à vos amis.
CO-OPÉRER pour stopper le changement climatique !

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-MBATTRE le changement climatique !

CONSEILS QUOTIDIENS
 Fermez le robinet lorsque vous n'avez pas besoin de l'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-NSERVER les ressources !

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 CO₂ (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 pour produire de l'énergie, pour le chauffage et pour la production d'énergie.
 Il est possible de réduire son empreinte carbone en adoptant des habitudes plus sobres.
 Comment ? Lisez les conseils - **CO-NSERVER** ! **CO-MBATTRE** ! **CO-OPÉRER** !

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-NSERVER les ressources !

Je fais les courses avec mon joli sac réutilisable, plus de sac.
Magasin
 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-MBATTRE le changement climatique !

Le papier dont vous n'avez pas besoin peut être recyclé. Recyclez le papier, sauvez les forêts !
 Plastique
 Papier
 Bio

Le vélo c'est chouette !
Planter des arbres, ils absorbent le dioxyde de carbone !

ÉCOLOGIE
 École
 Maison
 Magasin
 Transport
 Recyclage
 Vélo
 Plantes

LA BOÎTE CLIMAT

P.N.U. U.N.E.P.

Questions

1. 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 ?

- 1) porter un pull chaud et des chaussettes ;
- 2) mettre un tapis sous ses pieds ;
- 3) manger quelque chose ;
- 4) boire un thé chaud ;
- 5) allumer un radiateur électrique ;
- 6) danser, sauter ou courir ;
- 7) allumer un feu dans le poêle ou la cheminée ;
- 8) prendre un bain chaud ;
- 9) s'asseoir au soleil.

2. Quelle est la solution la plus économique et à quel moment : prendre un bain ou prendre une douche ?

3. L'installation de compteurs d'eau peut-elle aider à économiser l'énergie ? Pourquoi ?

4. Consommons-nous de l'énergie lorsque nous utilisons de l'eau dans un immeuble résidentiel ? Quel type d'énergie consommons-nous ?

5. Qu'avez-vous déjà mis à place chez vous pour faire des économies d'énergie ?

6. Quels sont les points importants à se rappeler lors de l'utilisation d'un réfrigérateur ?



Exercices

Exercice 1. 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.

Exercice 2. 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 parcourue 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.).

Exercice 3. 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.



3.5. | Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable

Jusqu'à la fin des années 1970, les seules personnes à se préoccuper du changement climatique étaient les scientifiques. En 1979, la première Conférence mondiale sur le climat a été organisée et un certain nombre de rapports ont été présentés, lesquels ont permis de démontrer 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. Le Groupe a été chargé d'examiner les preuves scientifiques disponibles et d'indiquer de quelle façon l'activité humaine affectait le climat.

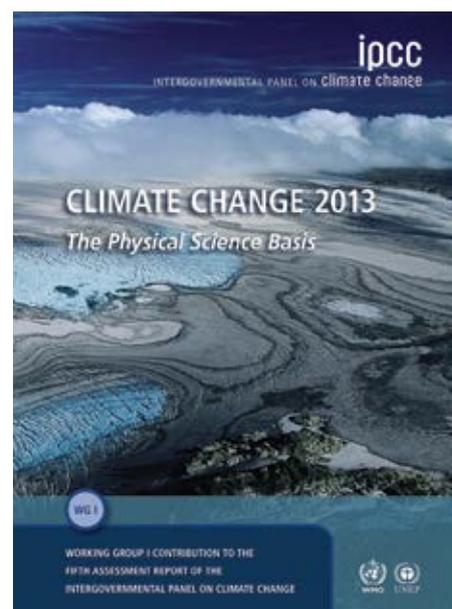
Le premier rapport du GIEC, publié en 1990, a confirmé que le risque de changement climatique était réel et qu'il y avait un lien direct entre l'activité humaine et les processus atmosphériques. Quatre autres rapports du GIEC ont depuis été publiés, le dernier datant de 2013, lesquels ont permis d'évaluer le changement climatique en se fondant sur les recherches scientifiques les plus récentes menées par des scientifiques du monde entier.

La plupart des scientifiques s'accordent à dire que nous pouvons, et devons, trouver des moyens de lutter contre le changement climatique. 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, les différents pays du monde ont convenu, lors d'une conférence internationale spéciale de l'ONU, de la nécessité de coopérer sur les questions liées au climat. L'accord a été compilé dans un document international, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.



United Nations
Framework Convention on
Climate Change



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. 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 au XXI^e 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, 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.

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 ont finalement refusé, en 2001, de le signer.

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, 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 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 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 bien plus substantielles que les précédentes.

Cependant, pour diverses raisons, l'attitude d'un certain nombre de pays a l'égard du Protocole de Kyoto a changé. Les États-Unis, le Canada, le Japon, la Nouvelle-Zélande et la Russie ont décidé de ne pas ratifier 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 ne provient pas des pays développés, mais 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.



Nous pouvons donc distinguer plusieurs étapes dans les efforts entrepris par l'humanité pour lutter 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. Néanmoins, la composition des pays durant la seconde période d'engagement est différente de celle de la première période ;
- 2015 – Adoption de l'Accord de Paris qui comprend les contributions nationales déterminées (NDC) par les différents pays ainsi que des mesures ambitieuses à long terme pour parvenir à réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Après 2020 – l'Accord de Paris entre en vigueur.



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 nationales déterminées » (CND), 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 en dessous de 2 °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, ainsi que le soutien technologique et financier de ces actions. L'Accord de Paris fournit uniquement un cadre juridique aux actions relatives au changement climatique menées à partir de 2020, tandis que des décisions plus détaillées quant à sa mise en œuvre restent encore à venir au cours des prochaines années.

Une coopération internationale effective pourrait permettre au monde de se tenir à l'objectif 2 °C et de s'adapter à aux changements climatiques déjà à l'œuvre résultant des émissions antérieures et actuelles de gaz à effet de serre. 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.

La coopération internationale en matière de changement climatique est étroitement liée à l'autre préoccupation principale de l'humanité, à savoir comment parvenir au développement durable pour assurer la prospérité à l'échelle mondiale. Le développement durable requiert des actions qui se complètent mutuellement dans trois domaines : économique, social et environnemental. Le changement climatique impacte l'ensemble de ces trois domaines.



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. L'Objectif 13 vise à « Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » (Fig. 3.5.1).



OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Fig. 3.5.1. 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 18 % des 7 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 fourniture de services énergétiques propres, efficaces, abordables et fiables est l'élément crucial de la prospérité mondiale, et grâce à une utilisation efficace des ressources énergétiques, nous pouvons lutter contre le changement climatique. En revanche, une politique climatique ciblée encourage l'utilisation rationnelle et efficace des ressources énergétiques.

Les changements de comportement et de mentalité des ménages et des individus sont très importants pour la mise en place de ces efforts. Chacun peut personnellement contribuer à atténuer l'impact du changement climatique en adoptant des modes de consommation plus durables, comme le vélo, l'adoption d'un régime alimentaire sain, riche en fruits et légumes de saison et produits localement, la réduction du nombre de déchets que nous produisons, la réutilisation des matériaux lorsque cela est possible, ainsi que l'adoption de mesures pour économiser l'électricité et l'eau.

Exercices

Exercice 1.

Dans cette série d'exercices, vous pouvez vous essayer au rôle de négociateur international. Lisez les « 10 conseils destinés au négociateur international » et apprenez-les par cœur.

10 conseils destinés au négociateur international

1. Concentrez-vous sur le sujet dont il est question. Ne vous en écarter 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.
3. Paraphraser les dires de 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 d'une culture étrangère.
7. Essayez de ne pas faire vos propres interprétations du comportement de quelqu'un d'autre.
8. Ne vous pressez pas à 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.

Exercice 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.

Exercice 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 ?



Directives destinées aux enseignants

concernant l'utilisation de la trousse
à outils de la Boîte Climat dans
les établissements scolaires



partie
4

4. | Directives destinées aux enseignants concernant l'utilisation de la trousse à outils de la Boîte Climat dans les établissements scolaires

La Boîte Climat est une trousse à outils d'apprentissage interactive sur le changement climatique destinée aux élèves du secondaire et du primaire et à leurs professeurs de sciences naturelles et d'études environnementales.

Les supports ont été préparés par le PNUD, avec l'appui du FEM, du Ministère de l'environnement et des ressources naturelles russe, et de la société Coca-Cola. La Boîte Climat poursuit la série des trousse à outils destinées aux élèves préalablement élaborées et présentées par le PNUD et ses partenaires : Module sur la Mer Noire et Petit Coffre au Trésor du Baïkal.

Objectifs de la Boîte 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 de la Boîte Climat contient les éléments suivants :

- un manuel scolaire illustré à destination des élèves contenant du matériel d'apprentissage, des exercices interactifs et individuels, et des questions sur le thème du changement climatique ;
- des directives destinées aux enseignants sur la façon d'utiliser la trousse à outils pendant les cours en fonction de l'âge des enfants ;
- un Quiz sur le Climat – un ensemble de cartes de jeu ;
- une carte intitulée « Changement climatique : Les effets négatifs sur l'environnement et les êtres humains, si nous ne faisons pas tout ce qui est en notre pouvoir pour réduire les émissions de gaz à effet de serre » ;
- une affiche intitulée « Changement climatique : comment réduire votre empreinte carbone ».

Manuel scolaire de la Boîte 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 prévenir les changements climatiques dangereux ? ». Le manuel aide les élèves à développer des connaissances et des compétences pour distinguer les différents types de climats et de zones naturelles ; explique la relation entre les différents composants géographiques des systèmes naturels ; enseigne comment distinguer, décrire et expliquer 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 enseigne 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.

Les tableaux figurant aux pages 240 à 251 indiquent comment intégrer la Boîte Climat au programme national. Les présentes directives mettent clairement l'accent sur le programme éducatif russe, néanmoins elles contiennent des informations précieuses qui pourraient être utiles aux programmes d'autres pays, dont beaucoup ont un format semblable au programme russe.

Le manuel contient de nombreux 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, les villes et les pays, et offre aux élèves l'opportunité d'analyser eux-mêmes les informations et d'élaborer des hypothèses et des prévisions pertinentes pour la région où ils vivent concernant les processus et phénomènes naturels.

Les directives visent à permettre aux enseignants de transmettre à leurs élèves une compréhension scientifique du monde qui les entoure, de développer leurs capacités intellectuelles et leur soif de connaissance. 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 figurant dans le manuel offrent l'opportunité 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, des illustrations et des idées d'expériences précis. 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 quiz, et de cercles d'études.

L'équipe des auteurs espère sincèrement que la trousse à outils de la Boîte Climat encouragera les élèves, les enseignants et les parents à modifier leur style de vie en vue d'une meilleure conscience environnementale.

Programmes éducatifs

Enseignement primaire

- Programme éducatif École 2100. Le monde qui nous entoure. Auteurs : A.A. Vahhrushev, D.D. Danilov, A.S. Rautian et autres.
- Le programme éducatif Harmony. Le monde qui nous entoure. Auteur : O.T. Poglazova.
- Le programme Ecole de Russie. Le monde qui nous entoure. Auteur : A.A. Pleshakov.

Enseignement secondaire

- Sciences naturelles. Classe 5. Auteurs : A.A. Pleshakov, N.I. Sonin
- Biologie. Classes 6 à 9. Auteurs : N.I. Sonin, V.B. Zakharov, E.T. Zakharova
- Biologie. Classes 10 et 11. Auteurs : I.B. Agafonov, V.I. Sivoglazov

- Géographie. Classes 6 à 9. Auteurs V.P. Dronov et autres
- Géographie. Classes 10 et 11. Auteur : V.P. Maksakovsky
- Chimie. Classes 8 et 11. Auteurs : O.S. Gabrielyan
- Physique. Classes 7 à 9. Auteurs : A.V. Peryshkin, E.M. Gutnik
- Physique. Classes 10 et 11. Auteur : L.E. Gendenshtein
- Environnement, santé et sécurité. Classes 5 à 9. Auteur : I.K. Toporov

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE			
Section dans le manuel de la Boîte Climat	Le monde qui nous entoure		
	Programme École 2100	Programme Harmony	Programme École de Russie
Partie 1. Le problème du changement climatique			
1.1. Climat et temps	<p>Classe 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Temps et climat • Thème : Les zones naturelles <p>Classe 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'air, ses propriétés et ce qu'il contient 	<p>Classe 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les différents types de nuages <p>Classe 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les phénomènes naturels et la nature • Thème : La température et la mesure des températures • Activité extérieure : Observer les changements qui se produisent dans la nature à l'automne • Thème : Les prévisions météorologiques • Activité extérieure : Observer les changements qui se produisent dans la nature en hiver • Thème : Changements au niveau de l'eau et du ciel en hiver • Activité extérieure : Observer les changements qui se produisent dans la nature au printemps • Thème : Changements au niveau de l'eau et du ciel au printemps • Thème : Changements au niveau de l'eau, du ciel, des plantes et des animaux en été. Règles de sécurité à observer durant les vacances d'été <p>Classe 4</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les zones naturelles de la Russie • Thème : le milieu naturel où je vis 	<p>Classe 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : La température et le thermomètre • Thème : Qu'est-ce que le temps
1.2 Les types de climat et les zones climatiques	<p>Classe 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les zones naturelles • Thème : Le climat sur Terre • Thème : Les zones de milieu naturel 	<p>Classe 4</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'hostile Arctique • Thème : La vulnérable toundra • Thème : Les déserts brûlants • Thème : Les montagnes • Thème : Les zones naturelles de la Russie • Thème : Le continent de l'Eurasie, sa nature et ses peuples • Thème : L'Afrique et sa nature. Chercheurs africains • Thème : L'Amérique. La découverte de l'Amérique. Amérique du Nord et du Sud • Thème : L'Australie, sa faune et sa flore uniques • Thème : L'Antarctique, sa découverte par les explorateurs russes, son environnement hostile 	<p>Classe 4</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Distribution de la chaleur solaire sur Terre et impact sur la nature vivante • Thème : Les zones naturelles de notre pays : déserts arctiques, toundra, forêt, steppe, déserts, zones subtropicales • Thème : Les caractéristiques naturelles de chaque zone • Thème : Comment l'économie dépend des conditions naturelles. Les problèmes environnementaux associés à chaque zone naturelle

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel de la Boîte Climat	Le monde qui nous entoure		
	Programme École 2100	Programme Harmony	Programme École de Russie
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé	-	Classe 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'astronomie. La Terre – une planète du système solaire • Thème : Le soleil et les étoiles. L'influence du soleil sur la Terre • Thème : Tour du monde 	-
1.4. Le changement climatique de nos jours	-	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'homme, partie intégrante de la nature Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'air et ce qu'il contient • Thème : Les mouvements d'air. Comment l'air est utilisé 	Classe 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Le passé et le présent à travers le regard d'un écologiste. Comprendre les problèmes écologiques modernes de la planète
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	-	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les orages. Règles de sécurité à observer en cas d'orage • Thème : Organismes et phénomènes naturels • Thème : L'eau sur Terre. Les océans et les mers. Règles de sécurité à observer en mer Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les phénomènes naturels inhabituels. Règles de sécurité à observer en cas de phénomènes météorologiques extrêmes • Thème : Changements au niveau du ciel et de l'eau en été. Règles de sécurité à observer durant les vacances d'été Classe 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Le milieu naturel où je vis 	-
2.2. Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les zones de milieu naturel 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Le continent de l'Eurasie. Études portant sur l'Asie. La nature du continent et ses populations • Thème : L'Afrique et sa nature • Thème : Le milieu naturel des continents du nord et du sud • Thème : La nature hostile du continent 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Quels sont les différents végétaux : arbres, arbustes et herbes. Comment les différencier • Thème : Quels sont les différents animaux : Insectes, poissons, oiseaux et animaux. Comment les différencier. • Thème : Livre rouge de la Russie : reconnaître les différents types de plantes et d'animaux ; mesures relatives à leur protection Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les plantes et leur diversité • Thème : La reproduction et la croissance des animaux. Le rôle des animaux dans la nature et la vie humaine. Impact de l'homme sur le monde animal

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Le monde qui nous entoure		
	Programme École 2100	Programme Harmony	Programme École de Russie
2.3. Les effets du changement climatique sur les forêts	-	Classe 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : La Russie, pays de forêts • Thème : Le milieu naturel où je vis 	Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les interconnexions dans la nature • Thème : Le sol et sa composition. Les êtres vivants du sol. Comprendre de quoi le sol est fait et le rôles des organismes vivants
2.4. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau	Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les organismes et les substances. • Thème : L'eau et ses propriétés. 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'eau sur Terre. Les océans et les mers. • Thème : La valeur des cours d'eau pour les populations. • Thème : Les réservoirs d'eau douce. La rivière et ses différentes parties. • Thème : L'importance de l'eau dans la vie sur Terre. La pollution des espaces aquatiques. Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Structure et propriétés des substances. • Thème : Le cycle de l'eau dans la nature. 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'air et l'eau, leur importance pour les plantes, les animaux et l'homme. • Thème : La pollution de l'air et de l'eau. Protéger l'air et l'eau de la pollution. • Thème : Les plantes sauvages et les cultures. Les plantes d'intérieur et comment s'en occuper. Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : L'eau et ses propriétés. Les trois états de l'eau. Le cycle de l'eau dans la nature.
2.5. Les effets du changement climatique sur l'agriculture	-	-	-
2.6. Les effets du changement climatique sur les régions côtières	-	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : La surface de la Terre. Les continents et les océans 	-
2.7. Les effets du changement climatique sur les régions montagneuses	Classe 3 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les roches et les minéraux 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les types de montagnes • Thème : Les volcans. Règles de sécurité à observer en montagne • Thème : La nature des montagnes 	-
2.8. Les effets du changement climatique sur la région arctique	-	Classe 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Zone naturelle. L'hostile Arctique 	-
2.9. Les effets du changement climatique sur les villes et la santé	-	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Les villes russes. Les villes d'un million d'habitants • Thème : Les populations citadines et rurales. Les problèmes de la ville moderne 	Classe 2 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : La ville où je vis et ses principales caractéristiques
2.10. Les effets du changement climatique sur les problèmes sociaux	-	-	-

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel de la Boîte Climat	Le monde qui nous entoure		
	Programme École 2100	Programme Harmony	Programme École de Russie
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	Classe 3 • Thème : L'énergie comme source de mouvement • Thème : Les diverses formes d'énergie • Thème : L'électricité, la lumière du soleil et la pluie sont des phénomènes énergétiques	-	-
3.1.3. Les combustibles fossiles	Classe 3 • Thème : La tourbe, le charbon, le pétrole et le gaz naturel – les combustibles fossiles et leur provenance	-	-
3.1.4. L'énergie nucléaire	-	-	-
3.1.5. Les énergies renouvelables	-	Classe 2 • Thème : Les mouvements d'air.	-
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	-	Classe 2 • Thème : Le soleil, la planète la plus proche de la Terre Classe 3 • Thème : Les minéraux et les combustibles fossiles, leur exploration et leur extraction • Thème : Les combustibles fossiles. Les problèmes environnementaux liés à leur production et leur transport	-
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie 3.2.1. Transports respectueux de l'environnement 3.2.2. Appareils électroménagers	-	Classe 2 • Thème : Les types de transport. Pollution de l'air et de l'eau causée par le transport	-
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs 3.2.4. Les villes vertes	-	Classe 4 • Thème : Les matériaux de construction	-

ENSEIGNEMENT PRIMAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Le monde qui nous entoure		
	Programme École 2100	Programme Harmony	Programme École de Russie
3.3. L'empreinte carbone 3.4. Comment puis-je aider la planète. En réduisant votre empreinte carbone	Classes 2 à 4 <ul style="list-style-type: none"> • Thème : Apprendre à démêler les tâches de la vie quotidienne • Thème : Comment vivre en harmonie avec la nature • Thème : Notre petite planète Terre 	-	-
3.5. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable	-	-	-

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
Partie 1. Le problème du changement climatique						
1.1. Climat et temps	<p>Classe 5</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le temps (principales caractéristiques du temps). Le climat 	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le chauffage de l'air et la température de l'air Thème : La dépendance de la température aux latitudes Thème : L'humidité dans l'atmosphère. La vapeur d'eau et l'humidité Thème : Les précipitations Thème : La pression atmosphérique. Mesurer la pression atmosphérique Thème : Le temps. Les composants météorologiques. Les masses d'air Thème : Le climat. Les cartes climatiques 	-	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La pression atmosphérique 	-
1.2 Les types de climats et les zones climatiques	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'atmosphère et le climat de la Terre Thème : Les zones climatiques et les particularités météorologiques de chaque continent : Afrique, Australie, Amérique du Sud, Amérique du Nord, Antarctique et Eurasie <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le climat et les ressources climatiques 	-	-	-	-
1.3. Comment et pourquoi le climat a-t-il changé par le passé	-	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les courants marins. Leur origine et leur impact sur la nature. Interaction avec l'atmosphère et la terre Thème : L'enveloppe rocheuse de la Terre Thème : Le mouvement des plaques lithosphériques <p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les océans <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La structure géologique 	<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Comment la vie est apparue et s'est développée dans les temps les plus anciens 	-	<p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Éléments d'astronomie 	-

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
1.4. Le changement climatique de nos jours	Classe 5 <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'impact des conditions météorologiques sur l'état des organismes vivants et la santé humaine 	Classe 6 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les êtres humains et l'atmosphère : une influence mutuelle 	Classe 9 <ul style="list-style-type: none"> Thème : La biosphère et l'homme. Le rôle de l'homme dans la biosphère Thème : Les ressources naturelles et leur utilisation Thème : Les problèmes environnementaux, leurs conséquences sur nos vies Classes 10 et 11 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les principaux problèmes environnementaux (mondiaux) des temps modernes 	-	-	Classe 5 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les êtres humains et leurs lieux de vie, la sécurité humaine
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	Classe 5 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les ouragans et tornades 	Classe 6 <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'homme et l'atmosphère 	-	-	-	Classe 6 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les catastrophes naturelles et les moyens de s'en protéger Classe 7 <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les phénomènes naturels rares et dangereux et les moyens de s'en protéger Classes 5 à 8 <ul style="list-style-type: none"> Exercices pratiques pour élaborer des techniques d'intervention en cas de catastrophe

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
2.2. Les effets du changement climatique sur les plantes et les animaux	<p>Classe 5</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La diversité biologique, son appauvrissement et les moyens de la préserver Thème : Les causes de la diminution de la biodiversité Thème : Préoccupations formulées par le public et les gouvernements quant à la préservation des espèces rares et menacées de plantes et d'animaux (Livre rouge) 	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La faune et la flore (sur chaque continent) <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La diversité des composants naturels 	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La diversité du plancton, son importance dans la nature et pour la vie humaine Thème : L'importance des mammifères dans la nature et la vie humaine. Protéger les animaux précieux <p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les conséquences biologiques de l'adaptation <p>Classes 10 et 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Préserver la diversité des espèces en vue du développement durable de la biosphère. Pourquoi certaines espèces disparaissent-elles? 	-	-	-
2.3. Les effets du changement climatique sur les forêts	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les zones naturelles sur les continents <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les forêts 	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les communautés naturelles et les écosystèmes. La structure et la relation des communautés naturelles <p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La circulation des substances dans la nature 	-	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les catastrophes naturelles et les moyens pour l'homme de s'en protéger – Les incendies de forêt
2.4. Les effets du changement climatique sur les ressources en eau	-	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les eaux intérieures <p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le rôle de l'eau dans l'évolution dans l'environnement Thème : Le rôle de l'eau dans la vie sur Terre <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les eaux intérieures, la richesse de la Russie 	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les types de liaisons chimiques. Les liaisons covalentes Thème : Les substances pures et les mélanges <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Liaisons chimiques covalentes polaires Thème : Le rôle de l'eau dans les réactions chimiques 	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les Écluses, canalisations d'eau Thème : Les navires et les bateaux 	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les catastrophes naturelles et les moyens pour l'homme de s'en protéger – les inondations

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
2.5. Les effets du changement climatique sur l'agriculture	-	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'économie <p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Géographie de l'agriculture et la pêche Thème : Les régions et pays du monde 	-	-	-	-
2.6. Les effets du changement climatique sur les régions côtières	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Section : L'hydrosphère Thème : Les océans du monde. Le rôle de l'hydrosphère dans la vie sur Terre. Interaction entre l'océan et la terre 	-	-	-	<p>Classe 7</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Situations d'urgence causées par la nature et l'homme : les ouragans
2.7. Les effets du changement climatique sur les régions montagneuses	-	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Section : La lithosphère terrestre Thème : La formation du relief terrestre Thème : Les montagnes. Zones climatiques à haute altitude 	-	-	-	<p>Classes 5 et 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Situations dangereuses d'origine naturelle : les tremblements de terre et glissements de terrain
2.8. Les effets du changement climatique sur la région arctique	-	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les glaciers, le pergélisol <p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les déserts arctiques, la toundra Thème : Les lacs. Les glaciers 	-	-	-	<p>Classe 6</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Situations dangereuses en milieu naturel : les avalanches et les blizzards
2.9. Les effets du changement climatique sur les villes et la santé	-	<p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'urbanisation, un processus mondial 	-	-	-	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Environnement et sécurité – la santé publique
2.10. Les effets du changement climatique sur les problèmes sociaux	-	<p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Aspects géographiques des problèmes humains planétaires 	-	-	-	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les situations d'urgence provoquées par l'homme et leurs conséquences

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
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				<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le carbone, ses propriétés physiques et chimiques Thème : Les sources naturelles d'hydrocarbures. Le pétrole et le gaz naturel, et la façon dont ils sont utilisés <p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le pétrole Thème : Le gaz naturel Thème : Le charbon 	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les combustibles. Unité thermique produite par la combustion 	
3.1.4. L'énergie nucléaire	-	-	-		<p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'énergie atomique, nucléaire 	-
3.1.5. Les énergies renouvelables	-	<p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les principaux types d'utilisation des ressources naturelles 	-		<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La production d'électricité <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les types de centrales électriques alternatifs 	-

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Chimie	Physique	Environnement, santé et sécurité
3.1.6. Avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie	-	-	-	<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les sources naturelles d'hydrocarbures. Le pétrole et le gaz naturel, et la façon dont ils sont utilisés <p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Le pétrole Thème : Le gaz naturel Thème : Le charbon 	<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La production d'électricité <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les types de centrales électriques alternatifs Thème : L'énergie atomique, nucléaire 	-
3.2. Efficacité énergétique et économie d'énergie			<p>Classes 10 et 11</p> <p>Thème : Les solutions aux problèmes environnementaux</p>	<p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les alcools 	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les moteurs thermiques Thème : L'efficacité énergétique. La deuxième loi de la thermodynamique <p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La thermodynamique. Les moteurs thermiques 	-
3.2.1. Transports respectueux de l'environnement						
3.2.2. Appareils électroménagers et appareils électriques						
3.2.3. Constructions écologiques. Bâtiments actifs et passifs		<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Géographie de la sphère sociale. L'économie des industries du logement et des loisirs 			<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : La production d'électricité <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les centrales nucléaires alternatives 	-
3.2.4. Les villes vertes						

ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

Section dans le manuel scolaire de la Boîte Climat	Sciences naturelles	Géographie	Biologie	Química	Physique	Environnement, santé et sécurité
<p>3.3. L'empreinte carbone</p> <p>3.4. Comment puis-je aider la planète. En réduisant votre empreinte carbone</p>			<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Protection de la nature et utilisation rationnelle des ressources naturelles <p>Classes 10 et 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Comment se comporter en milieu naturel. <p>Protection de la nature et utilisation rationnelle des ressources naturelles</p>	<p>Classe 8</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les phénomènes physiques et chimiques. Les réactions chimiques <p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les halogènes Thème : Les sels de l'acide nitrique Thème : Les substances biologiquement importantes - protéines, graisses et glucides Thème : La pollution chimique de l'environnement et ses conséquences <p>Classe 10</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les protéines Thème : Les acides nucléiques Thème : Les médicaments <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les états liquides et solides des substances 	<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : L'énergie <p>Classe 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les énergies alternatives 	
	<p>3.5. Coopération mondiale sur le changement climatique et le développement durable</p>		<p>Classes 10 et 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Aspects géographiques des problèmes humains planétaires auparavant et actuellement, et solutions à ces problèmes 	<p>Classes 10 et 11</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Les conséquences de l'activité humaine sur l'environnement 	<p>Classe 9</p> <ul style="list-style-type: none"> Thème : Relations entre les organismes et l'environnement 	

Table des Illustrations

Couverture. Photo : BigRoloImages, Shutterstock.com.

P. 5. Photo fournie par T. Stocker.

P. 9. Photo : J. Swanepoel, Shutterstock.com.

P. 11. Fig. 1.1. : NASA, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>

P. 13. Fig. 1.1.1. : Peel, M. C., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification (Central Asia). Extrait de Wikipedia. Photo (bas) : Shutterstock.com.

P. 14. Fig. : Shutterstock.com.

P. 15. Fig. 1.2.1. : Wikipedia.

P. 17. Photo (haut) : R. Loesche, Shutterstock.com. Photo (centre) : Semork, Shutterstock.com. Photo (bas) : apdesign, Shutterstock.com.

P. 18. Photo (haut) : A. Latsun, Shutterstock.com. Photo (centre) : rdonar, Shutterstock.com. Photo (bas) : Susan R. Serna, Shutterstock.com.

P. 19. Photo : axily, Shutterstock.com.

P. 20. Fig. 1.2.2. : I. Frolov, Institut de l'Arctique et de l'Antarctique. Fig. 1.2.3. : J. Sullivan, Wikipedia. Fig. 1.2.4. : NASA. Fig. 1.2.5. : T. Skambos, National Research Centre for Snow and Ice, USA.

P. 23. Mots croisés : Élaborés par l'auteur sur la base de la version russe rédigée par S. Korshchikova.

P. 24. Fig. (gauche) : M. Anton, Public Library of Science, publié sur Wikipedia. Photo (droite) : H. Grobe, Wikipedia. Fig. 1.3.1. : A.O. Kokorin, E.V. Smirnova, D.G. Zamolodchikov. Climate Change. Book for High School Teachers. - Moscou : WWF, 2013. 220 p.

P. 25. Photo (à gauche et en haut à droite) : M. Dunn, NOAA Climate Program Office, Expédition NABOS 2006. Photo (en bas à droite) : L. Koenig, NASA.

P. 26. Fig. 1.3.3. : A. Alekperov. Fig. 1.3.4. : <http://school-collection.lyceum62.ru>.

P. 27. Fig. : Catmando, Shutterstock.com.

P. 28. Fig. 1.3.5. : J. Hansen et 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 p. <http://www.springer.com/>.

P. 29. Fig. 1.3.6. : Changements climatiques 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. 31. Fig. 1.3.8. : <http://www.britishmuseum.org>. Photo : A. Jack, Shutterstock.com.

P. 32. Fig. 1.3.9. : <http://earthobservatory.nasa.gov/>. Photo : Y. Kumsri, Shutterstock.com.

P. 35. Fig. 1.4.1. : L'Organisation météorologique mondiale (OMM), 2017 : https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414. Fig. 1.4.2. : Changements climatiques 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. 36. Fig. 1.4.3. : <http://climate.nasa.gov/evidence/>.

P. 37. Fig. 1.4.4. : J. Hansen et 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 p. <http://www.springer.com/>.

P. 38. Fig. 1.4.5. : A.O. Kokorin, E.V. Smirnova, D.G. Zamolodchikov, Climate Change. Book for High School Teachers. - Moscou : WWF, 2013. - 220 p.

P. 39. Fig. 1.4.6. : L'Organisation météorologique mondiale, 2017 : https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414. Fig. 1.4.7. NASA, <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>.

P. 40. Fig. 1.4.8. : Changements climatiques 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. 41. Fig. 1.4.9. : D. Belyukin, <http://www.belukin.ru/>

P. 42. Photo : A. Tikhonov, Shutterstock.com.

P. 44. Photo : H. Grobe, Wikipedia.

P. 45. Photo : scenery2, Shutterstock.com.

P. 47. Photo (en haut à gauche) : P. Steib, Shutterstock.com. Photo (en haut à droite) : Wutthichai, Shutterstock.com. Photo (en bas à gauche) : Siriporn-88, Shutterstock.com. Photo (en bas à droite) : P. Litovchenko.

P. 48. Fig. 2.1. : A. Alekperova, V. Berdin, Y. Dobrolyubova, Y. Kalinicheva, A. Kokorin.

P. 49. Fig. 2.1.1. : V. Kantor.

P. 50. Fig. 2.1.2. : Image de la NASA par J. Schmaltz, LANCE/EOSDIS Rapid Response, <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=86539>.

P. 51. Photo (en haut à gauche) : <http://earthobservatory.nasa.gov/>. Photo (en haut à droite) : T. Shoemake, Shutterstock.com. Photo (en bas à gauche) : D. Bertonceli, Shutterstock.com. Photo (en bas à droite) : B. Sosnovy, Shutterstock.com.

P. 52. Photo (en haut à gauche) : R.A. Mansker, Shutterstock.com. Photo (en haut au centre) : ChameleonsEye, Shutterstock.com. Photo (en haut à droite) : Site Internet du Président de la Fédération de Russie, kremlin.ru. Photo (en bas à gauche) : W. Dias / Agencia Brasil, Wikipedia. Photo (en bas à droite) : B. Dyakovsky, Shutterstock.com.

P. 53. Photo (gauche) : R. Bayer, Shutterstock.com. Fig. 2.1.3. : R. Stockli et R. Simmon s'appuyant sur les données de la MODIS Land Science Team, NASA, <http://earthobservatory.nasa.gov/>.

P. 54. Photo : D.J. Rao, Shutterstock.com.

P. 55. T. Th. Walthers, Wikipedia.

P. 57. Photo : ChameleonsEye, Shutterstock.com.

P. 58. Collage : A. Alekperova.

P. 59. Fig. (haut) : <http://34374.info/wp-content/uploads/2011/07/nils.jpg>. Photo (gauche) : S. Tulinov. Photo (droite) : Simm, Wikipedia.

P. 60. Photo (haut) : M.M. Karim, Wikipedia. Photo (bas) : MarcusVDT, Shutterstock.com.

P. 61. Collage : A. Alekperova, basé sur les illustrations de Wikipedia.

P. 62. Photo : Kletr, Shutterstock.com.

P. 63. Photo (première) : Xocolatl, Wikipedia. Photo (deuxième) : N. Tomura, Wikipedia. Photo (troisième) : Wilson44691, Wikipedia. Photo (quatrième) : D. Bogdanov, Wikipedia.

- P. 64.** Photo (haut) : jamon.jp, Wikipedia. Photo (bas). P. Kapitola, State Phytosanitary Administration, Bugwood.org.
- P. 65.** Photo (première) : Fraan, Photobucket.com. Photo (deuxième) : Smithsonian National Museum of Natural History. Photo (troisième) : Vlad61, Shutterstock.com. Photo (quatrième) : S. Baron, Wikipedia.
- P. 66.** Photo (première) : S. Uryadnikov, Shutterstock.com. Photo (deuxième) : martinhlavacek79, Shutterstock.com. Photo (troisième) : Argus fin, Wikipedia. Photo (quatrième) : D. Charman, <http://blogs.exeter.ac.uk/antarcticpastclimate/2013/01/20>. Photos (cinquième) : edmon, Shutterstock.com.
- P. 67.** Photo (haut) : elitravo, Shutterstock.com. Photo (en bas à gauche) : M. Opp, Wikipedia. Photo (en bas au centre) : Silky, Shutterstock.com. Photo (en bas à droite) : freestock.ca.
- P. 68.** Photo (première) : Lorcel, Shutterstock.com. Photo (deuxième) : MarkVanDykePhotography, Shutterstock.com. Photo (troisième) : G. Yim, Shutterstock.com. Photo (quatrième) : L. Galuzzi
- P. 69.** Photo (haut) : S. Myatyashev, <http://stasmat.livejournal.com/15402.html?thread=77610>. Photo (en bas à gauche) : Département forestiers du Rothaargebirge. Photo (en bas à droite) : M. Manske, Wikipedia.
- P. 70.** Photo (première) : SNEHIT, Shutterstock.com. Photo (deuxième) : <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. 71.** Photo : http://pohod.h12.ru/FOTOAlbum/Taganay/f_t_21.jpg.
- P. 72.** Photo (gauche et droite) : <http://www.laparios.com/>.
- P. 73.** Photo : UICN
- P. 76.** Fig. 2.3.1. : Source : MA 2005. Carte conçue par Emmanuelle Bournay, Paris.
- P. 77.** Fig. 2.3.2. : <http://blog.pershyn.name/2011/09/2011.html>.
- P. 78.** Fig. 2.3.3 et 2.3.4. : D. Zamolodchikov.
- P. 79.** Fig. 2.3.5. : Shiyatov, 2009. Photo (bas) : El Misti, Wikipedia.
- P. 80.** Fig. 2.3.6. : J.F. Stuefer, Wikipedia.
- P. 81.** Fig. 2.3.7. : Fishlin et al., 2007.
- P. 82.** Fig. 2.3.8. : www.rosleskhoz.gov.ru. Fig. 2.3.9. : D. Zamolodchikov.
- P. 83.** Fig. 2.3.10. : D. Zamolodchikov.
- P. 84.** Fig. 2.3.11. : D. Zamolodchikov.
- P. 85.** Fig. 2.3.12 et 2.3.13. : V. Kaganov. Fig. 2.3.14. : D. Zamolodchikov.
- P. 86.** Fig. 2.3.15. : D. Zamolodchikov.
- P. 87.** Fig. 2.3.16. : V. Kaganov. Fig. 2.3.17. : D. Zamolodchikov.
- P. 88.** Fig. 2.3.18. : D. Zamolodchikov. Fig. 2.3.19. : The State of the Forests of Papua New Guinea, 2008.
- P. 89.** Photo : A. Fedorov, Shutterstock.com.
- P. 90.** Fig. 2.3.20 et 2.3.21. : D. Zamolodchikov.
- P. 94.** Photo (haut) : T. Spider, Shutterstock.com. Fig. 2.4.1. : <http://www.astronet.ru/db/msg/1224153>.
- P. 95.** Photo (haut) : S. Tulinov. Photo (en bas à gauche) : L. Nunes, Wikipedia. Photo (en bas à droite) : G. Paire, Shutterstock.com.
- P. 96.** Fig. 2.4.2. : PNUF, <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/article155.html>.
- P. 97.** Fig. 2.4.3. : Entreprise unitaire fédérale d'État NPO Lavochkina. Fig. 2.4.4. : Wikipedia (gauche). N. Palmer, Centre international d'agriculture tropicale (CIAT), <http://flickr.com/photos/38476503@N08/5641586406> (droite).
- P. 98.** Fig. 2.4.5. : E. Harrison, magazine National Geographic, volume 31 (1917), page 272 (gauche). Rjruiziii, Wikipedia (droite). Fig. 2.4.6. : Katvic, Shutterstock.com. Fig. 2.4.7. : Rapport sur les ressources en eau du National Climate Assessment, USA <http://nca2014.globalchange.gov/report>.
- P. 99.** Fig. 2.4.8. : A. Bezlepkin. Fig. 2.4.9. : Octal, Wikipedia.
- P. 100.** Fig. 2.4.10. : BK Bates et al. Changements climatiques et ressources en eau. Étude technique du GIEC. – Genève 2008.
- P. 102.** Photo : N. Palmer, Wikipedia.
- P. 103.** Photo (haut) : V. Salman, Shutterstock.com. Photo (bas) : Ratikova, Shutterstock.com.
- P. 104.** Photo (en haut à gauche) : R. Jary, Shutterstock.com. Photo (en haut à droite) : Gleizes, Greenpeace. <http://www.greenpeace.org/>. Photo (bas) : I. Strukov, Shutterstock.com.
- P. 105.** Photo (haut) : J. Tran, Shutterstock.com. Photo (bas) : A. Bondarets, Shutterstock.com.
- P. 106.** Photo (gauche) : D. Henry, Shutterstock.com. Photo (droite) : Stasis Photo, Shutterstock.com.
- P. 108.** Photo : B. Jevtic, Shutterstock.com.
- P. 109.** Photo : zstock, Shutterstock.com.
- P. 110.** Photo (gauche) : S. Tulinov. Photo (droite) : JaySi, Shutterstock.com.
- P. 111.** Fig. 2.6.1. : R. Rowley, J. Kostelnick, D. Braaten et al. Risk of rising sea level to population and land area. 2007. Photo : Z. Pereira da Mata, Shutterstock.com.
- P. 112.** Photo : R. Whitcombe, Shutterstock.com. Fig. 2.6.2. : Wikipedia. Fig. 2.6.3. : A. Kolotilin, WWF Russie.
- P. 113.** Photo (haut) : N. Mitchell, Shutterstock.com. Fig. 2.6.4. : Rapport d'évaluation « Key environmental and socio-economic effects of climate change in permafrost areas: a forecast based on synthesis of observations and modelling ». Ed. O. Anisimov. – SPb. : Institut hydrologique d'État, 2009. Fig. 2.6.5. : M. Grigoriev (ibid). Photo (bas) : LippertPhotography, Shutterstock.com.
- P. 114.** Photo : AlinaMD, Shutterstock.com. Fig. 2.6.6. : <http://peakwatch.typepad.com/a/6a00d83452403c69e20154358c6598970c-pi>.
- P. 115.** Fig. 2.6.7. : Changements climatiques 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. 2.6.8. : graphique : <http://oceanadapt.rutgers.edu/>, représentation du bar noir : Encyclopaedia Britannica, <http://global.britannica.com/media/full/530475/132944>.
- P. 116.** Photo (gauche) : ermess, Shutterstock.com. Photo (droite) : withGod, Shutterstock.com.
- P. 118.** Photo : S. Ilyas, Wikipedia.
- P. 119.** Photo : momanuma, Shutterstock.com.
- P. 120.** Fig. 2.7.1. : A. Alekperova et Yu. Dobrolyubova s'appuyant sur le contenu du site <http://900igr.net/data/geografija>. Photo : D. Pichugin, Shutterstock.com.

- P. 121.** Fig. (haut) : Wikipedia. Photo (bas) : A. Egorov, Shutterstock.com.
- P. 122.** Fig. 2.7.2. : Service de surveillance mondial des glaciers (WGMS). Fig. 2.7.3. : Wikipedia.
- P. 123.** Fig. 2.7.4. : Service de surveillance mondial des glaciers (WGMS). Fig. 2.7.5. : M. Hëltsle, Université de Zurich, Service de surveillance mondial des glaciers (WGMS). Fig. 2.7.6. : NASA. Fig. 2.7.7. : NASA.
- P. 124.** Fig. 2.7.8. : Y. Dobrolyubova. Fig. 2.7.9. : Archive du parc national de Glacier.
- P. 125.** Fig. 2.7.10. : V. Kantor. Photo (gauche) : A. Gl, Shutterstock.com. Photo (droite) : M. Topchiy, Shutterstock.com. Fig. 2.7.11. A. Alekperova, Y. Dobrolyubova G. Tushinskaya.
- P. 126.** Photo (haut) : M. Topchiy, Shutterstock.com. Photo (milieu) : V. Kantor. Photo (bas) : L. Gridinoc, Wikipedia.
- P. 127.** Photo (gauche) : ANA Peru. Photo (droite) : Dtarazona, Wikipedia.
- P. 128.** Fig. 2.7.12. : NASA. Fig. 2.7.13. : 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. Photo : Pikoso.kz, Shutterstock.com.
- P. 129.** Photo : D. Lynch, Shutterstock.com.
- P. 131.** Reproduction photographique : Wikipedia.
- P. 133.** Photo : S. Dobrolyubov.
- P. 134.** Fig. 2.8.1. : <http://www.athropolis.com/map2.htm>.
- P. 135.** Photo (gauche) : Gazprom, <http://media.gazprom-neft.ru/pictures/production/category688/category689/AVD43214.jpg.htm>. Photo (droite) : Vlada Z, Shutterstock
- P. 136.** Fig. 2.8.2. : Centre national de données sur la neige et la glace (USA), http://nsidc.org/data/seaice_index/.
- P. 137.** Fig. 2.8.3. : Station polaire de recherche. <http://psc.apl.washington.edu/wordpress/research/projects/arctic-sea-ice-volume-anomaly>. Fig. 2.8.4. : A. Kokorin, WWF Russie.
- P. 138.** Photo : J. McDonald, Shutterstock.com. Fig. 2.8.5. : C. Accardo, AP Photo/NOAA.
- P. 139.** Photo : D. Pilipenko, Shutterstock.com.
- P. 140.** Fig. 2.8.6. : J. Shaw, <http://www.johnshawphoto.com/>.
- P. 141.** Fig. 2.8.7. : N. Shiklomanov. Rapport d'évaluation : « Key environmental and socio-economic effects of climate change in permafrost areas: a forecast based on synthesis of observations and modelling ». Ed. O. Anisimov. - SPb. : Institut hydrologique d'État, 2009. Fig. 2.8.8. : ibid. Fig. 2.8.9. : D. Drozdov, ibid.
- P. 142.** Fig. 2.8.10. : V. Romanovsky, ibid. Fig. 2.8.11. : M. Grigoriev, ibid. Fig. 2.8.12. : V. Romanovsky, Past and Present and Future Changes in Permafrost and Implications for a Changing Carbon Budget. Série de séminaires dans le domaine des sciences de l'environnement, 2008, American Meteorological Society.
- P. 143.** Fig. 2.8.13. et 2.8.14. : N. Shiklomanov, Rapport d'évaluation : Key environmental and socio-economic effects of climate change in permafrost areas: a forecast based on synthesis of observations and modelling. Ed. O. Anisimov. - SPb. : Institut hydrologique d'État, 2009.
- P. 144.** Photo (gauche) : G. Baturova (gauche) ; Photo (droite) : A. Walk, Wikipedia.
- P. 145.** Photo : S. Dobrolyubov
- P. 148.** Fig. 2.9.1. : F. Schmidt, Ellen J. Beer et al. (ed.), Berns grosse Zeit. Photo (ci-dessous) : KPG_Payless, Shutterstock.com.
- P. 149.** Fig. 2.9.2. : A. Alekperova et Y. Dobrolyubova s'appuyant sur le contenu du rapport World Urbanization Prospects 2014 - Highlights. - ONU, 2014. Tableau 2.9.1. : A. Alekperova s'appuyant sur le contenu de The World's Cities in 2016, ONU. http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf
- P. 150.** Fig. 2.9.3. : Pjt56, Wikipedia. Photo (gauche) : 1000 Words, Shutterstock.com. Photo (droite) : P. Rogat, Shutterstock.com.
- P. 151.** Fig. 2.9.4. : US Global Change Research Program (USGCRP), 2009. Reproduction du tableau (bas) : Wikipedia.
- P. 152.** Fig. 2.9.5. : Centre for Health Research School of Medicine, http://climatehealthcluster.org/wp-content/uploads/2013/06/Bambrick_Hillary_080813.pdf.
- P. 153.** Photo : ChameleonsEye, Shutterstock.com.
- P. 154.** Fig. 2.9.6. : B. Revich. Photo (gauche) : SW_Stock, Shutterstock.com. Photo (droite) : A. Ruzhin, Shutterstock.com.
- P. 155.** Fig. 2.9.5. : A. Haynes et autres. Climate change and human health - impacts, vulnerability and adaptation. Procès-verbal de la Conférence mondiale sur le changement climatique, Moscou, 2003. - Moscou, 2004.
- P. 157.** Photo : D. Bertoneceli, Shutterstock.com.
- P. 158.** Photo (en haut à gauche) : WorldWide, Shutterstock.com. Photo (en haut au centre) : P. Date, Shutterstock.com. Photo (en haut à droite) : g-stockstudio, Shutterstock.com. Photo (bas) : Kzenon, Shutterstock.com.
- P. 159.** Fig. 2.10.1. : Wikipedia.
- P. 160.** Photo (gauche) : S. DCruz, Shutterstock.com. Photo (droite) : G. Paire, Shutterstock.com.
- P. 161.** Photo (haut) : H. Conesa, Shutterstock.com. Photo (bas) : P. HaSon, Shutterstock.com.
- P. 162.** Fig. 2.10.2. : T. Hakala, Shutterstock.com. Fig. 2.10.3. : S. Gulec, Shutterstock.com. Fig. 2.10.4. : R. Whitcombe, Shutterstock.com.
- P. 163.** Photo : VVO, Shutterstock.com.
- P. 164.** Fig. 2.10.5. : Rapport du PNUD, Charting a New Low-Carbon Route to Development. - Moscou : PNUD, 2009.
- P. 167.** Pavel L Photo, Shutterstock.com.
- P. 169.** Fig. 3.1.1. : contenus du site keelingcurve.uesd.edu.
- P. 170.** Photo : wang song, Shutterstock.com.
- P. 171.** Fig. 3.1.2. : A. Alekperova, E. Gracheva, Yu. Dobrolyubova.
- P. 172.** Photo : huyangshu, Shutterstock.com.
- P. 173.** Fig. 3.1.3. : A. Alekperova. Photo : N. Vinokurov, Shutterstock.com.
- P. 174.** Fig. 3.1.4. : Key World Energy Statistics 2017, IEA. www.iea.org. Photo : K. Black, Wikipedia.
- P. 175.** Photo fournie par Greenpeace. Fig. 3.1.5. : <http://www.world-nuclear.org/>.
- P. 176.** Fig. : A. Alekperova. Photo : overcrew, Shutterstock.com.
- P. 177.** Photo (haut) : KPG Payless2, Shutterstock.com. Photo (bas) : M. Lisner, Shutterstock.com.

- P. 178.** Photo (haut) : wellphoto, Shutterstock.com. Fig. 3.1.6. : Dinga, Shutterstock.com.
- P. 179.** Photo (haut) : CSIRO, <http://www.scienceimage.csiro.au/pages/about/>. Photo (bas) : Northern Railways, <http://www.nr.indianrailways.gov.in/>.
- P. 180.** Photo (haut) : Chixoy, Wikipedia. Photo (bas) : <http://www.abengoasolar.com/>.
- P. 181.** Photo (haut) : Y. Dobrolyubova. Photo (centre) fournie par Greenpeace. Photo (bas) : D. Dixon, collection du projet Geograph : <https://www.geograph.org.uk/photo/2391702>
- P. 182.** Fig. 3.1.7. : Wikipedia (les deux photos).
- P. 183.** Photo : Arnold C., Wikipedia. Fig. 3.1.8. : Wikipedia.
- P. 184.** Fig. 3.1.9. M. Grmek, Wikipedia. Fig. 3.1.10. : Le Grand Portage, Wikipedia. Fig. 3.1.11. : Wikipedia.
- P. 185.** Photo (deux du haut) : <http://oceanrusenergy.ru/Gallery>. Photo (bas) : Dani 7C3, Wikipedia.
- P. 186.** Photo (haut) : S. Tulinov. Fig. 3.1.12. : fournie par Greenpeace.
- P. 187.** Photo : Wikipedia.
- P. 188.** Photo (haut) : Wikipedia. Photo (en bas à gauche) : K. Stuchelova, Shutterstock.com. Photo (en bas au centre) : apdesign, Shutterstock.com. Photo (en bas à droite) : Bildagentur Zoonar GmbH, Shutterstock.com.
- P. 189.** Fig. 3.1.13. : RSabbatini, Wikipedia. Fig. 3.1.14. : Natecull, Wikipedia. Photo (première en bas) : indogolotus, Shutterstock.com. Photo (deuxième en bas) : Dickelbers, Wikipedia.
- P. 190.** Photo : Hestemoj, Wikipedia.
- P. 196.** Fig. 3.2.1. : A. Alekperova.
- P. 197.** Photo (les deux) : A. Alekperova.
- P. 199.** Fig. 3.2.2. : Energy Efficiency in Russia: Hidden Reserves. - Moscou : CENEF, WB, IFC, 2008. Photo (gauche) : Arnold Paul, Wikipedia. Photo (centre) : US Federal Emergency Management Agency, Wikipedia. Photo (droite) : V. Dyakov, Wikipedia.
- P. 200.** Fig. 3.2.3. : A. Alekperova s'appuyant sur les contenus de l'Agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 2005.
- P. 201.** Fig. 3.2.4. : MK Products, Wikipedia. Fig. 3.2.5 : ENEA.
- P. 202.** Fig. 3.2.6. : <https://lufthansa.myclimate.org/en>. Fig. 3.2.7. : E. Smirnova.
- P. 203.** Photo : NRMA Motoring and Services, Wikipedia.
- P. 204.** Fig. 3.2.8. : Photo (gauche) : Wikipedia. Photo (droite) : Floydian, Wikipedia.
- P. 205.** Photo : (en haut à gauche) : P. van der Sluijs. Photo : (en haut à droite) Sacramento Seersucker Ride, <http://flickr.com/photos/56052306@N06/17107186918>. Photo (ci-dessous) : ehedaya, Wikipedia.
- P. 206.** Fig. 3.2.9. : A. Alekperova et Y. Dobrolyubova basé sur les contenus de Wikipedia. Fig. 3.2.10. : Wikipedia.
- P. 207.** Fig. 3.2.11. : PNUD, 2011.
- P. 208.** Photo (ci-dessus) : Wikipedia. Fig. 3.2.12. : Green Building Council of Finland, <http://figbc.fi/en/building-sector/>.
- P. 209.** Photo (haut) : fournie par Greenpeace. Logos : Wikipedia. Photo (ci-dessous) : A. Hodge, <http://www.usgbc.org/>.
- P. 210.** Fig. 3.2.13. : fournie par E. Gracheva. Photo (ci-dessous) : Bureau du Premier ministre britannique, <https://www.gov.uk>.
- P. 211.** Photo (haut) : www.sidwell.edu. Photo (bas) : <http://www.activehouse.info/cases/home-life>.
- P. 212.** Photo : Wikipedia.
- P. 213.** Photo (première et deuxième) : J. Seifert, Wikipedia. Photo (troisième) : US Navy National Museum of Naval Aviation. Photo (quatrième) : NASA.
- P. 214.** Photo (haut) : G. Jones, Wikipedia. Photo (bas) : ecstaticist, Wikipedia.
- P. 217.** Photo (gauche et centre) : Wikipedia. Photo (droite) : fournie par Greenpeace.
- P. 218.** Photos : <http://www.climate-kic.org/>, <http://wmsbf.org/>, <http://memoenglish.ru/>, <http://originalcarbon.com/why-offset/>, <http://www.Environment.in.th/>
- P. 219.** Wikipedia
- P. 221.** Fig. 3.4.1. et 3.4.2. : F. Urban, How we heat the street // Real Estate Bulletin, 18 janvier 2012. <http://www.bn.ru/articles/2012/01/18/89218.html>.
- P. 222.** Fig. 3.4.3. : F. Urban, How we heat the street // Real Estate Bulletin, 18 janvier 2012. <http://www.bn.ru/articles/2012/01/18/89218.html>.
- P. 226.** Photo : Wikipedia.
- P. 227.** Photo : C. Hutchingson, Wikipedia.
- P. 228.** Fig. 3.4.4. : A. Alekperova, V. Berdin, Yu. Dobrolyubova, Y. Kalinicheva, A. Kokorin.
- P. 231.** Photo (en haut à gauche) : Yu. Dobrolyubova. Photo (en haut à droite) : Wikipedia. Logo : Wikipedia. Page de couverture : www.ipcc.ch.
- P. 232.** Photo (ci-dessus) : T. Yamanaka – AFP/Getty Images, disponible sur <http://global.britannica.com/event/Kyoto-Protocol>. Photo (ci-dessous) : P. Souza, photo officielle de la Maison Blanche, publiée sur Wikipedia.
- P. 233.** Logo : <http://www.cop21paris.org/about/cop21>. Photo : ONU, <http://www.un.org/sustainabledevelopment>.
- P. 234.** Image (ci-dessus) : <http://hssmi.org/research-themes/sustainable-manufacturing/>. Fig. 3.5.1. : <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.
- P. 237.** Photo : E. Harrison, Wikipedia.

Vladimir Berdin, Yulia Dobrolyubova, Ekaterina Gracheva, Pavel Konstantinov, Natalia Ryzhova,
Elena Smirnova, Dmitry Zamolodchikov

La Boîte Climat

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

Manuel scolaire

Approuvé pour impression en 2018. Format 60x84/8. Feuilles impression standard 6.7.
Feuilles impression conditionnelle 29.7 Papier offset. Impression offset.
1 000 exemplaires. Commande N1257

RA ILF publications
Office 1, Building 1, 10 Bolshoi Kondratyevsky Lane, 123056,
Moscou

©PNUD, 2019

LA BOÎTE CLIMAT

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



Avec le soutien financier
de la Fédération de Russie

Coca-Cola



Au service
des peuples
et des nations