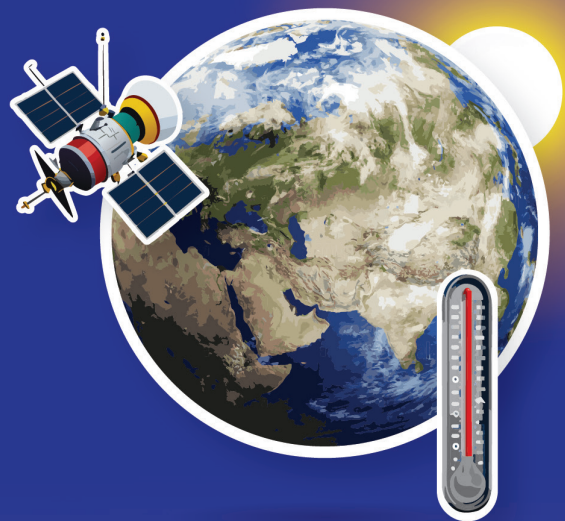




1

Le problème du changement climatique

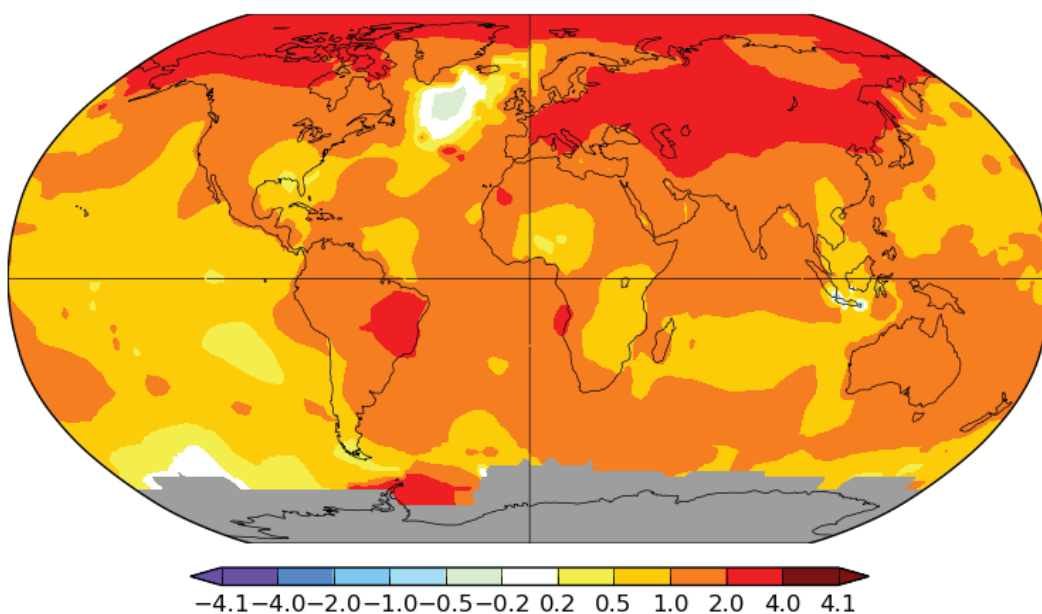
1 | Le problème du changement climatique

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

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

Figure 1.1

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



Les zones en gris indiquent que les données sont insuffisantes

La Terre se réchauffe !

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

Figure 1.2

Points saillants des principaux messages de l'AR6 du GIEC



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

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

Vous pouvez en savoir plus sur :

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

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

1.1 | Climat et temps

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

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

LE TEMPS

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

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

LE CLIMAT

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

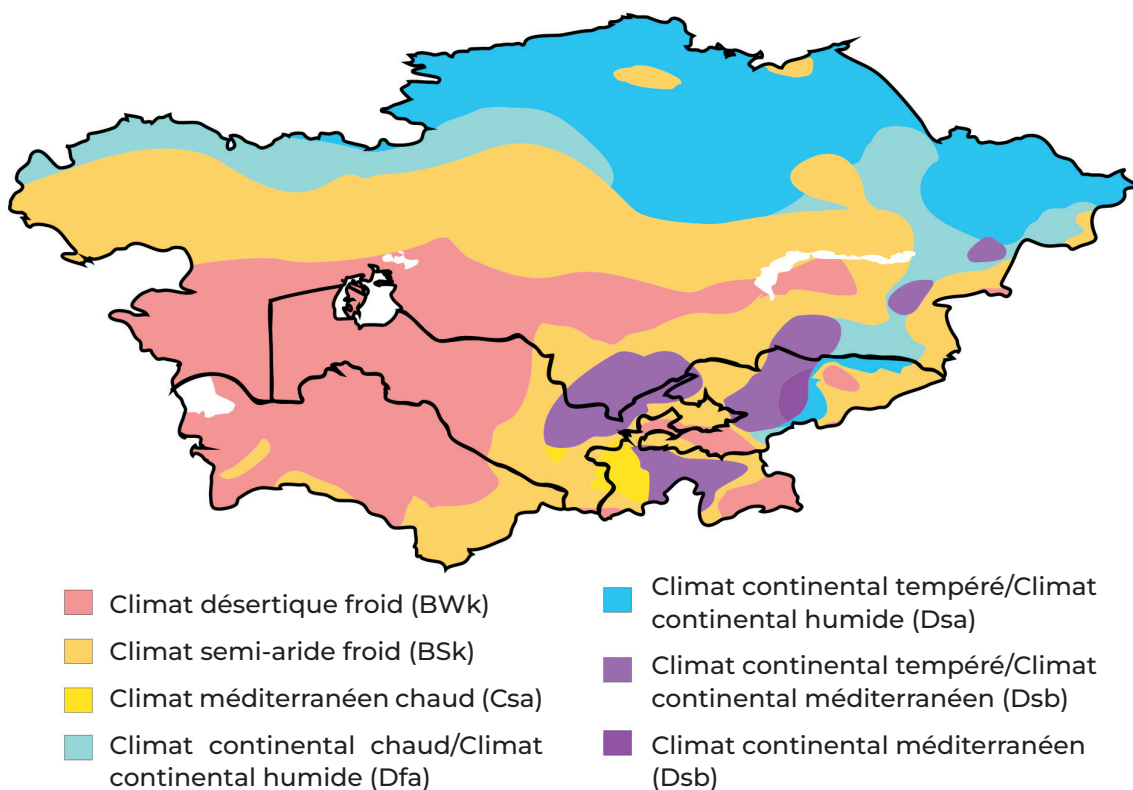
Par exemple : les étés sont chauds et secs, tandis que les hivers sont froids et humides avec de rares chutes de neige. Il s'agit d'une brève description du climat méditerranéen. Comme le dit le proverbe : « le climat c'est ce à quoi l'on s'attend, le temps c'est que l'on obtient ». On ne peut connaître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

Les principales caractéristiques du climat sont :

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

Figure 1.1.1

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



LA MASSE D'AIR

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

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



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

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

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



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



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



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



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



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



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



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



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

1.2 | Les types de climat et les zones climatiques

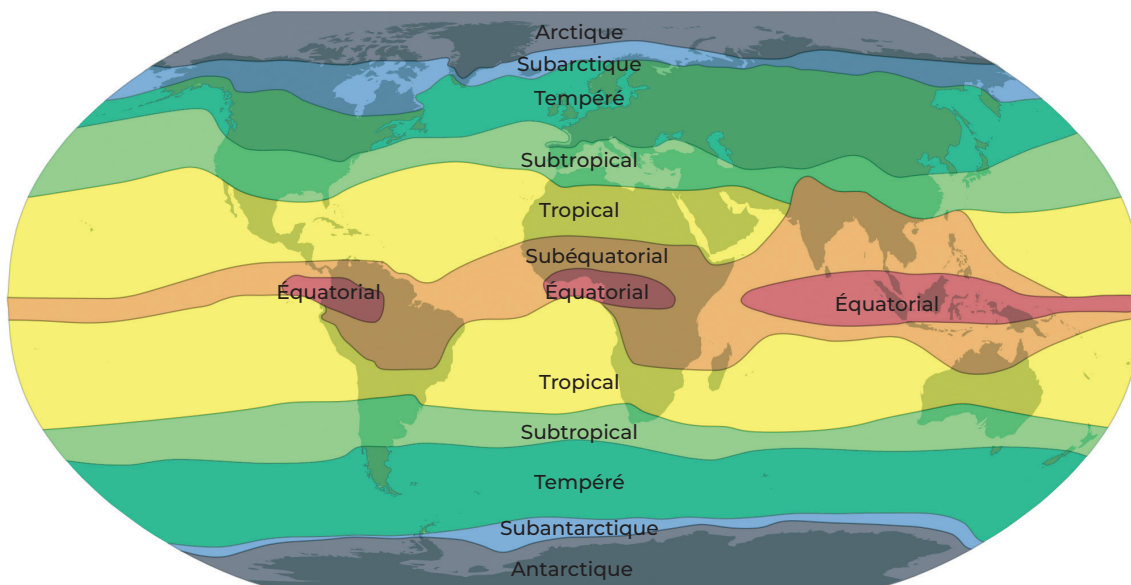
Les différentes parties du globe bénéficient de climats différents. Dans les pays du nord, lorsque les gens regardent par la fenêtre en hiver et voient de la neige partout, ils rêvent de partir en vacances dans des pays tropicaux, où ils pourront profiter du soleil et se baigner dans les eaux chaudes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

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

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

Figure 1.2.1

Les climats de la Terre (par Boris Alisov)



LES ZONES CLIMATIQUES

sont des zones possédant un climat relativement uniforme

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 1.2.1

Les climats de la Terre (par B. Alisov)

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

Brève description des différents climats



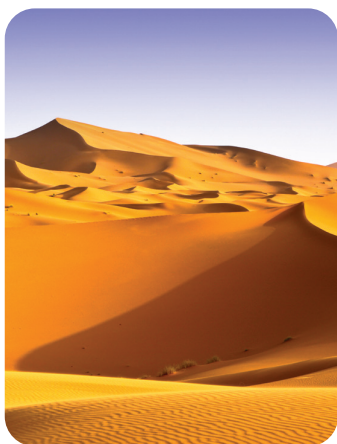
Climat équatorial

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



Climat subéquatorial

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



Climat tropical

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



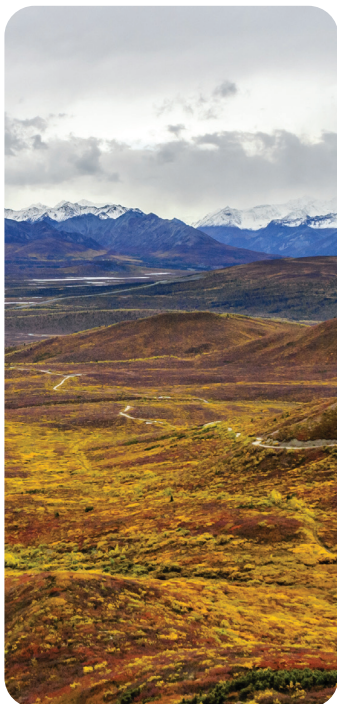
Climat subtropical

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



Climat tempéré

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



Climat subpolaire (subarctique, subantarctique)

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

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



Climat polaire (arctique, antarctique)

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

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

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

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. 1.2.5). L'OMM vérifie actuellement deux mesures de température de $+54,4^{\circ}\text{C}$, enregistrées au même endroit, le 16 août 2020 et le 9 juillet 2021. Si elles sont validées, ce serait la température la plus élevée sur Terre depuis 1913.

Figure 1.2.2

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

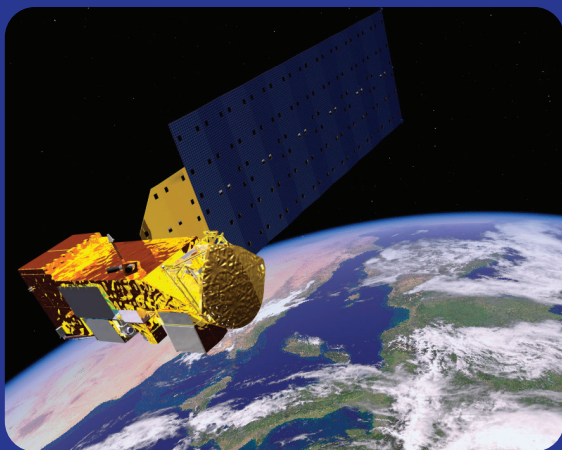


Figure 1.2.3

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

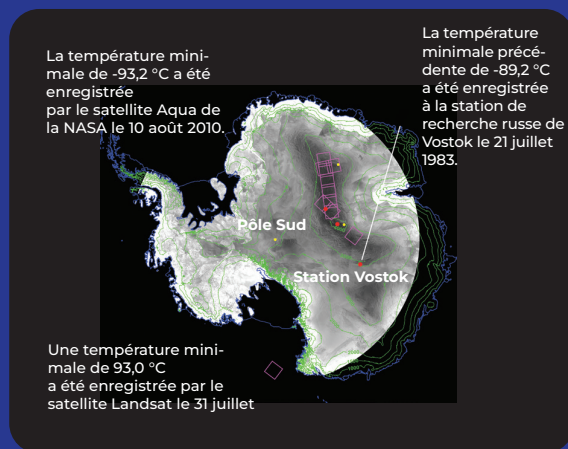


Figure 1.2.4

Station de recherche russe à Vostok en Antarctique



Figure 1.2.5

La Vallée de la mort, USA





QUESTIONS

1

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

2

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

3

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

4

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

5

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

6

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





EXERCICES



1

Jeu

Matériel : Cartes mentionnant les différentes caractéristiques des différents types de climat : équatorial, tropical, tempéré, polaire. Il s'agit d'un jeu pour 12 à 24 personnes. Chaque joueur reçoit une carte comportant une caractéristique climatique.

Le but du jeu est de parler avec les autres joueurs et de réunir, pour chaque groupe de joueurs, les différentes caractéristiques représentatives d'un climat donné. Chaque équipe mime ensuite aux autres groupes le type de climat qu'elle représente.

2

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

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

3

Qu'est-ce que des conditions climatiques « favorables » et « défavorables » ? Faites des groupes et choisissez un type de climat.

Faites des simulations et inventez des blagues concernant le type de climat que vous avez choisi.

4

Jeu

But du jeu : Avoir l'impression d'être dans un climat tropical et faire l'expérience d'une pluie tropicale journalière.

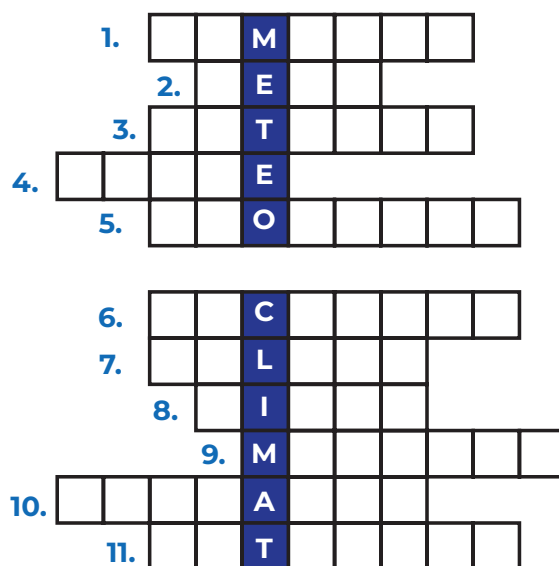
Comment jouer : Les joueurs forment un cercle. L'animateur se place au centre du cercle et effectue des mouvements à l'intention du reste du groupe. Chaque fois qu'il fait un mouvement, l'animateur tourne sur son axe. Il ne commence un nouveau mouvement que lorsque tous les joueurs composant le cercle ont commencé à imiter le mouvement précédent. Chaque joueur ne passe au mouvement suivant que lorsque l'animateur se trouve en face de lui. Pendant ce temps, les autres joueurs continuent le mouvement précédent.

Ordre des mouvements : L'animateur et le premier joueur (puis le second joueur, le troisième, etc.) joignent leurs paumes et effectuent des mouvements circulaires lents. Ils claquent ensuite des doigts, tapent des mains, se tapent les cuisses et enfin tapent des pieds. Une fois la séquence finie, toutes les actions sont répétées en ordre inverse. Le but est d'imiter le son d'une violente averse du début à la fin.

5

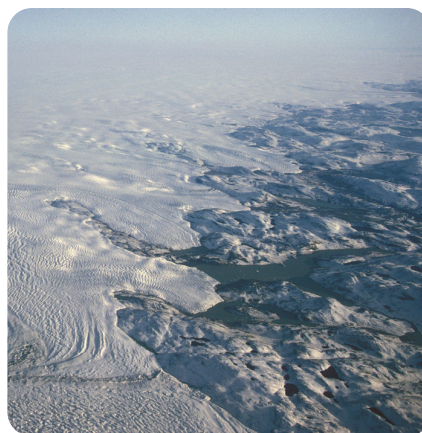
MOTS CROISÉS

1. Un phénomène météorologique violent avec des vents forts et parfois de la pluie.
2. Le mouvement de l'air causé par des différences de pression atmosphérique.
3. Une des saisons de l'année, marquée par la chute des feuilles.
4. Précipitations solides sous forme de petites billes de glace.
5. Un type de climat chaud et humide, typique des régions proches de l'équateur.
6. La région polaire située au nord de la Terre, avec des températures très basses.
7. L'étoile qui fournit lumière et énergie à la Terre et influence le climat.
8. Une saison froide, associée à la neige et aux basses températures.
9. Un vent saisonnier apportant souvent des pluies abondantes dans certaines régions.
10. Compositeur italien célèbre pour ses œuvres intitulées Les Quatre Saisons.
11. La hauteur au-dessus du niveau de la mer, influençant le climat et la température.



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

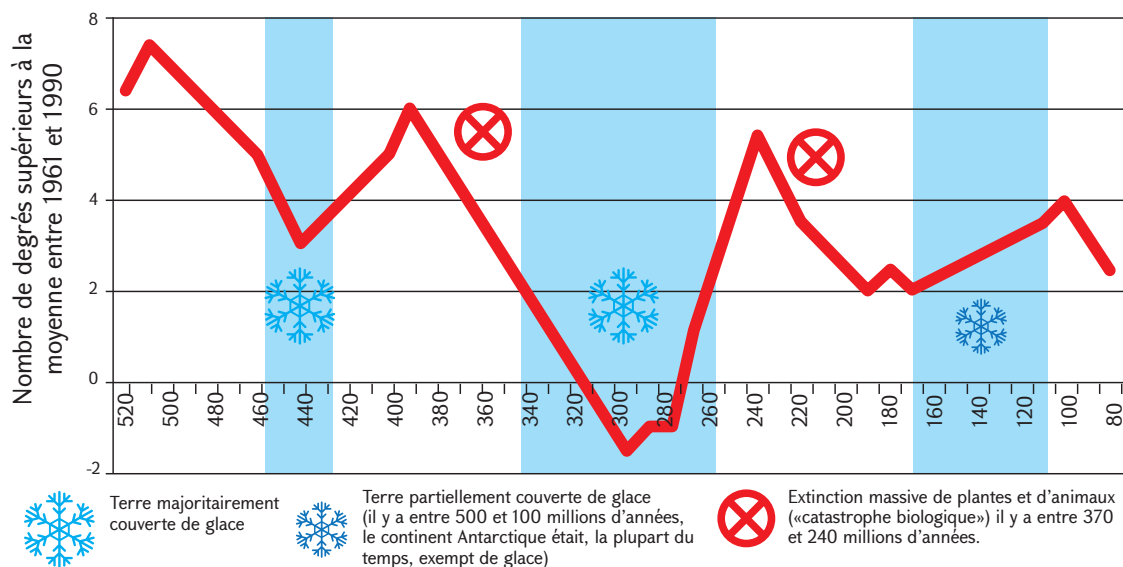
Il n'est pas difficile de démontrer que le climat de la Terre a toujours été soumis à des changements. Bien sûr, les personnages de dessins animés et de jeux vidéo concernant les dinosaures et la période glaciaire sont le fruit de l'imagination, mais les dinosaures ont réellement existé, comme en témoignent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



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

Figure 1.3.1

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



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

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

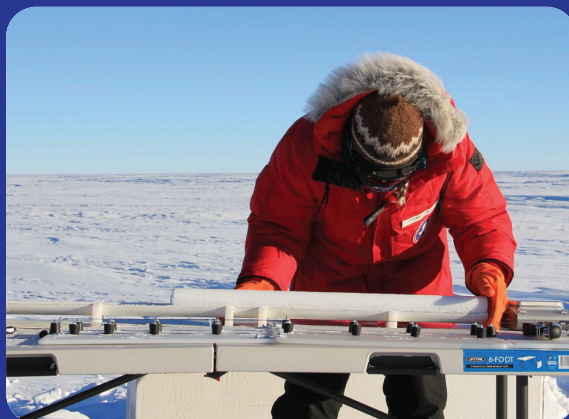
Les scientifiques disposent d'une meilleure source d'information pour déterminer les températures de ce dernier million d'années : ils utilisent la glace de l'Antarctique. La glace contient des bulles d'air qui témoignent de la composition de gaz dans l'atmosphère et de la température sur Terre par le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

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

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

Figure 1.3.2

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



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

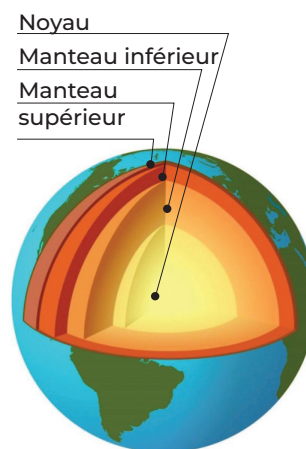
Pour tenter d'expliquer les changements climatiques majeurs qui se sont produits sur Terre depuis le dernier demi-milliard d'années, les scientifiques se sont intéressés à plusieurs facteurs géologiques, astronomiques, biologiques, géomagnétiques et cosmiques. Ils ont même envisagé la possibilité de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

Des continents en mouvement

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

Figure 1.3.3

Les couches de la terre



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

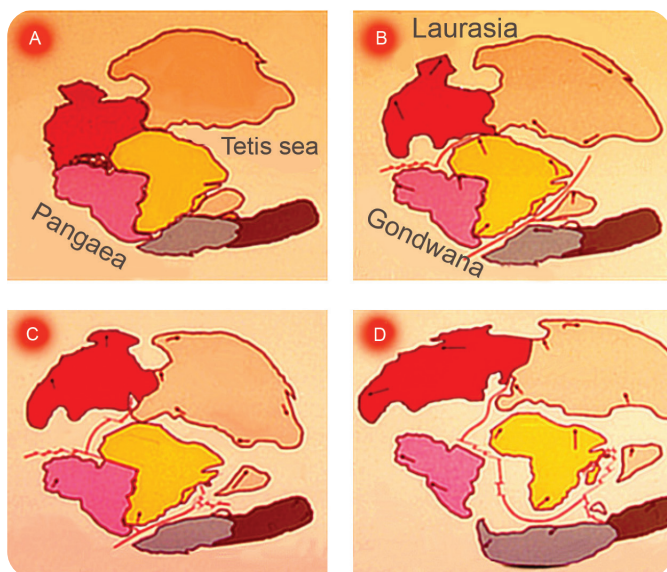


Figure 1.3.4

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

- A** – formation de la Pangée
- B** – division du continent de Pangée, formation de la Laurasia et du Gondwana
- C** – dissociation du Gondwana, formation de l'Hindustan, de l'Australie et de l'Antarctique
- D** – formation de l'Amérique du Sud, début de la division de la 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 de l'eau absorbent presque intégralement le rayonnement solaire et se réchauffent donc.

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

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

Pourquoi les dinosaures ont-ils disparu ?



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

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

Selon une autre théorie, une météorite géante aurait frappé la Terre au niveau de la zone correspondant

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

Il existe une autre version. Nous savons que pour certains reptiles (crocodiles, tortues), la température du sol détermine si des mâles ou des femelles 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 passage d'un climat invariable et humide à un climat comportant des changements saisonniers (même de petits changements) pourrait avoir laissé la place à de brèves périodes de nuits froides, durant lesquelles les énormes corps de reptile des dinosaures n'ont pu retenir suffisamment de chaleur. Nombre de ces animaux se seraient alors affaiblis et auraient fini par mourir.

Mais le changement climatique le plus important est intervenu il y a de cela 50 millions d'années, lorsque les continents se sont éloignés des pôles. La couverture de neige et de glace a diminué, et les températures ont augmenté jusqu'à 12 °C au-dessus des températures actuelles. Puis, « soudainement », l'Inde qui n'était auparavant qu'une petite plaque lithosphérique indépendante, a percuté l'Eurasie. Les montagnes de l'Himalaya sont 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.

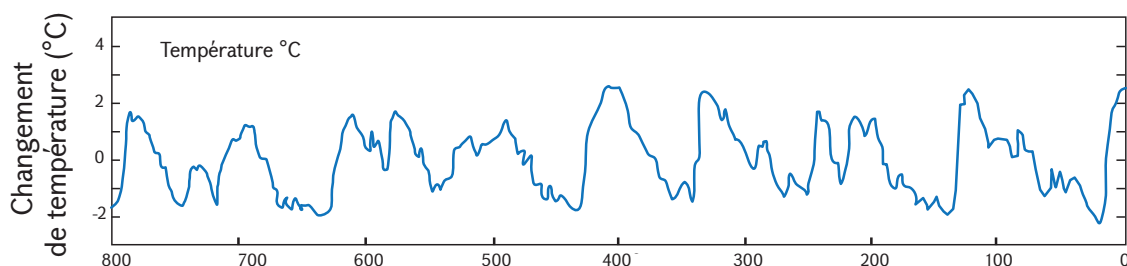
Il y a environ 10 millions d'années, le Groenland s'est établi à sa position actuelle et s'est couvert d'une couche de glace, ce qui a contribué à abaisser davantage les températures, à des niveaux proches des températures actuelles.

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 recouvert de glace, phénomène qui s'est reproduit avec le Groenland il y a 10 millions d'années, entraînant une chute des températures à leur niveau actuel.

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

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

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



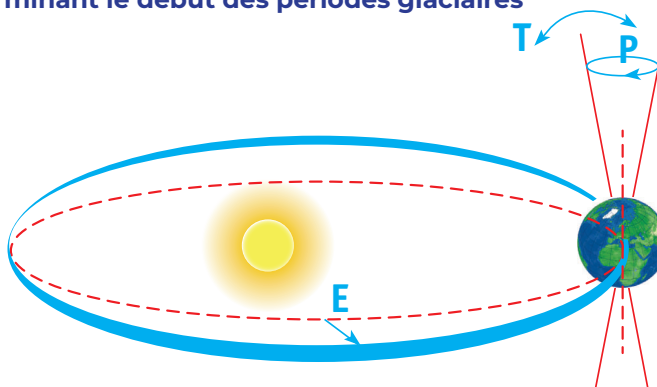
Quelle en est la raison ? Selon les scientifiques, l'alternance de périodes glaciaires et de périodes plus chaudes est d'origine astronomique (Fig. 1.3.6).

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

Figure 1.3.6

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

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



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

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

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

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

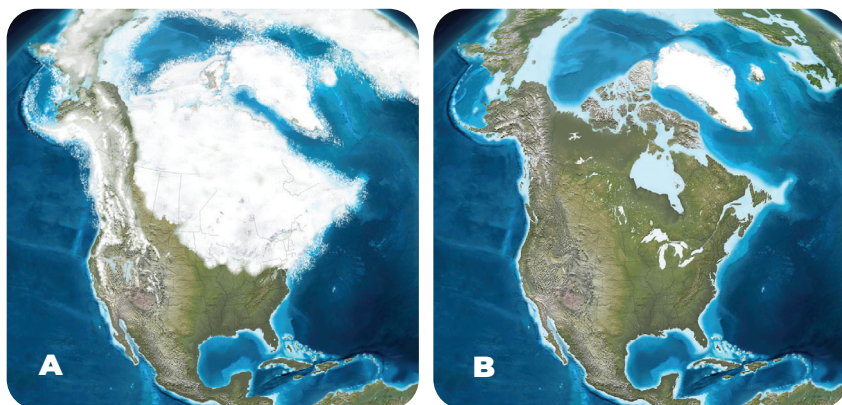


Figure 1.3.7

L'Amérique du Nord durant

A - l'ère glaciaire il y a 125 000 ans

B - de nos jours

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

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

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

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

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

1.3.3 | Les causes du changement climatique en siècles

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

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

Fluctuations de l'activité solaire

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

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

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



Figure 1.3.8

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

Éruptions volcaniques

Quel phénomène naturel nous surprend le plus par sa puissance et son énergie ? La réponse est assurément l'éruption volcanique. Selon vous, les volcans réchauffent-ils l'atmosphère de la Terre ou la refroidissent-ils ? De prime abord, on peut penser qu'ils contribuent à réchauffer l'atmosphère. Il est vrai que la lave chaude et les gaz brûlants 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 demandés pourquoi le climat avait viré au froid pendant un certain nombre d'années. La raison en a été l'éruption du volcan Tambora sur les terres de l'Indonésie actuelle (Fig. 1.3.9). La même chose s'est produite en 1983 après l'éruption du volcan El Chichon au Mexique, et en 1992 après l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines.

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

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

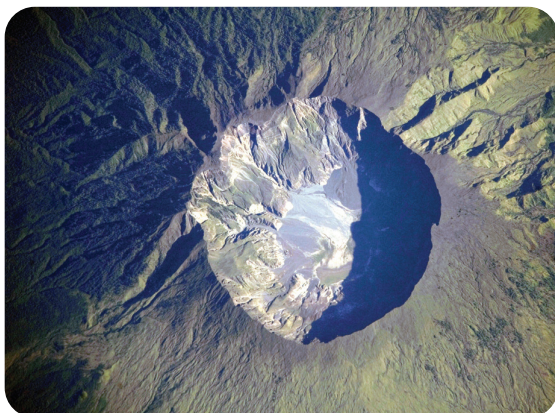


Figure 1.3.9

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

Courants océaniques

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



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



QUESTIONS

1

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

2

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

3

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

4

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

5

Pourquoi les périodes glaciaires se produisent-elles ?

6

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

7

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

8

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





EXERCICES



1

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

Ont-ils l'air de constituer un seul et même territoire ? Comment s'appelait cette terre ? Que lui est-il arrivé ?

Comment cela a-t-il affecté le climat de la Terre ? Pourquoi ?

2

Expérience

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

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

Quel morceau de pâte à modeler est tombé en premier lorsque la lampe a chauffé la feuille de papier ? Pourquoi ?

Donnez un exemple de processus semblable se produisant sur Terre.

3

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

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

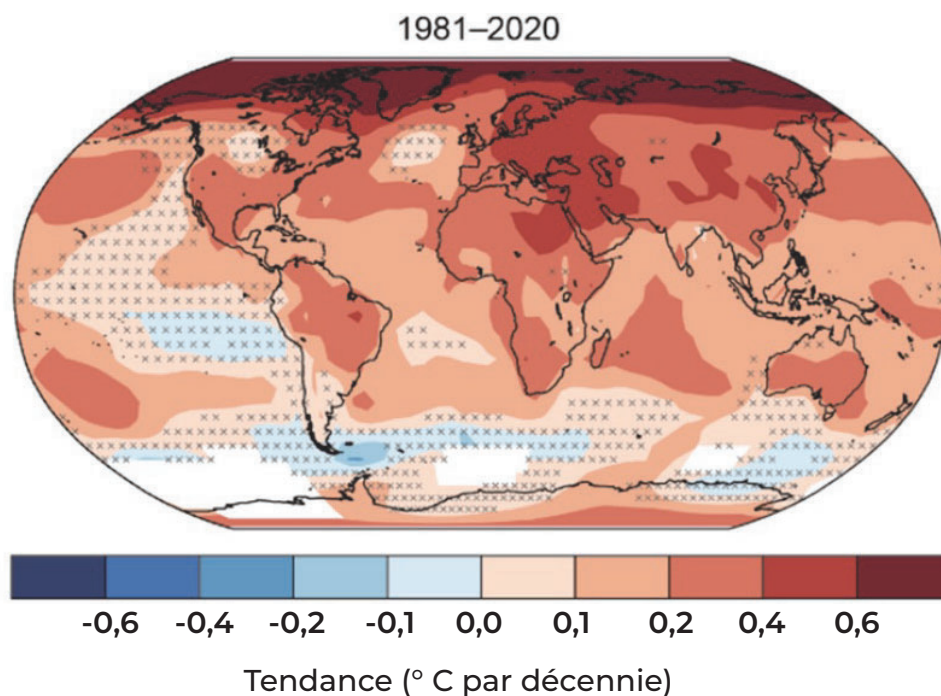
En supposant que l'Antarctique se déplace à une vitesse de 2 cm par an, combien d'années faudrait-il pour qu'un réchauffement de la terre résultant uniquement du mouvement de l'Antarctique soit suffisant pour permettre aux dinosaures de vivre de nouveau sur terre.

1.4 | Le changement climatique de nos jours

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

Figure 1.4.1

Carte des tendances comparatives des changements décennaux des températures dans différentes régions du globe (1981-2020 et 1850-1900)



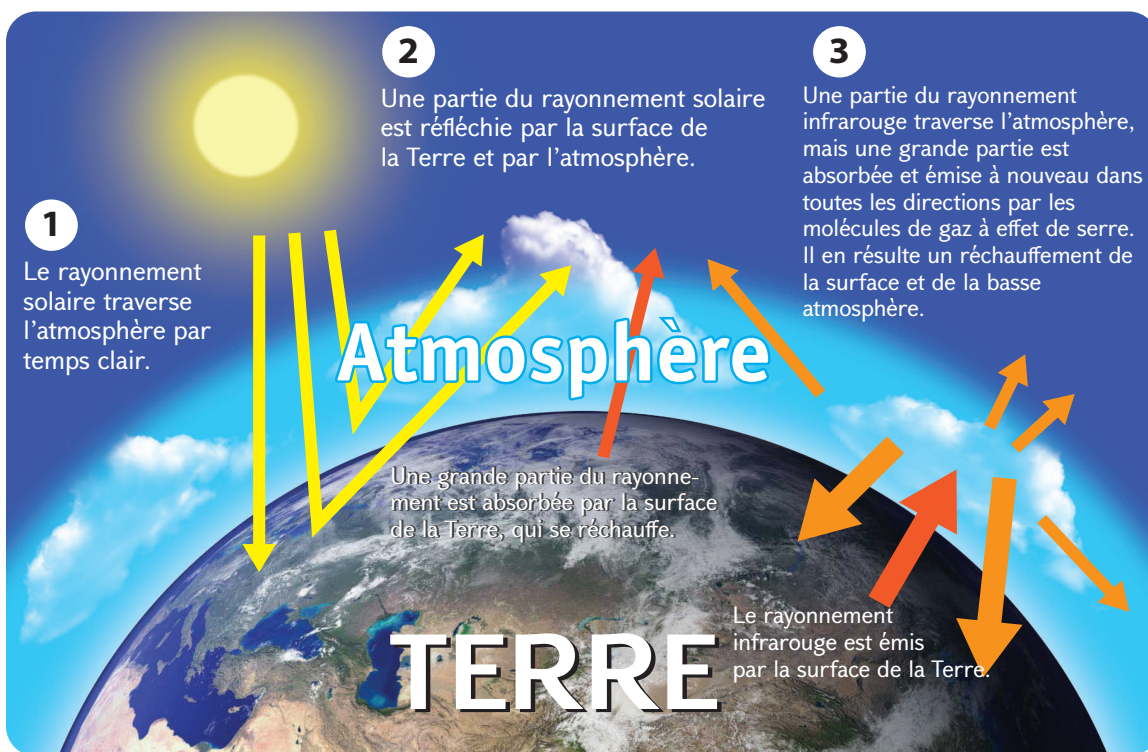
Selon les scientifiques, le réchauffement climatique actuel s'explique par une augmentation de ce que nous appelons « l'effet de serre ».

L'effet de serre

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

Figure 1.4.2

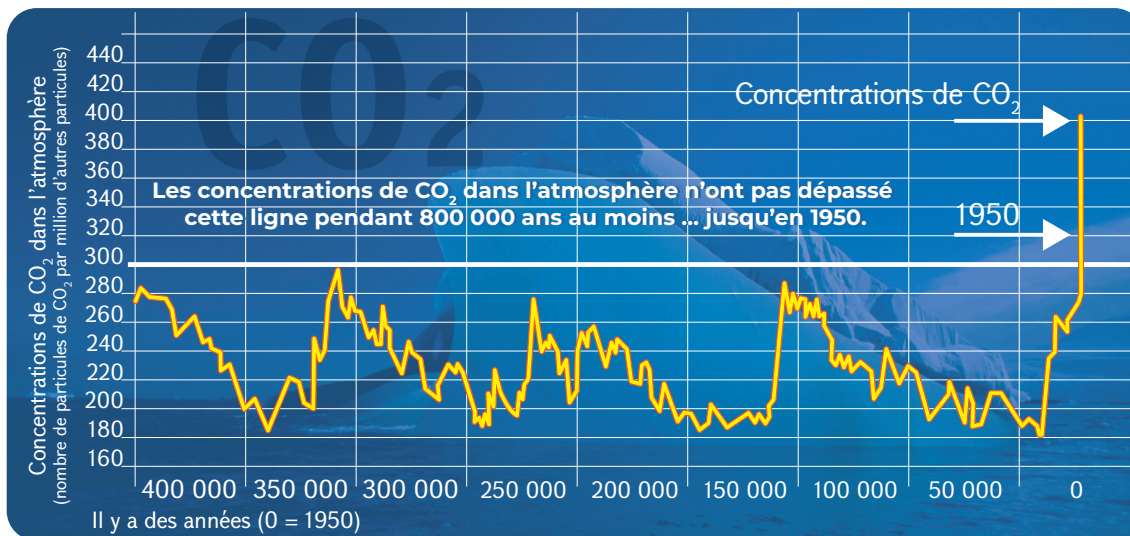
L'équilibre énergétique de la Terre et l'effet de serre



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

Figure 1.4.3

Concentrations de CO₂ 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 (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) ont atteint des niveaux records, plus élevés que jamais au cours des 800 000 dernières années au moins. La concentration naturelle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a varié à travers l'histoire de 180 à 300 parties par million (ppm) d'autres particules ! La dernière analyse des observations de l'OMM montre que les concentrations moyennes mondiales en surface de CO₂, CH₄ et N₂O ont atteint de nouveaux sommets en 2022, avec du CO₂ à 418 ppm et du N₂O à 336 ppm. Ces valeurs constituent respectivement des augmentations de 150 %, 264% et 124 % par rapport aux niveaux préindustriels. L'hypothèse selon laquelle l'activité humaine serait responsable de la hausse de l'effet de serre a pour la première fois été avancée par le scientifique suédois Svante Arrhenius, dès 1896.

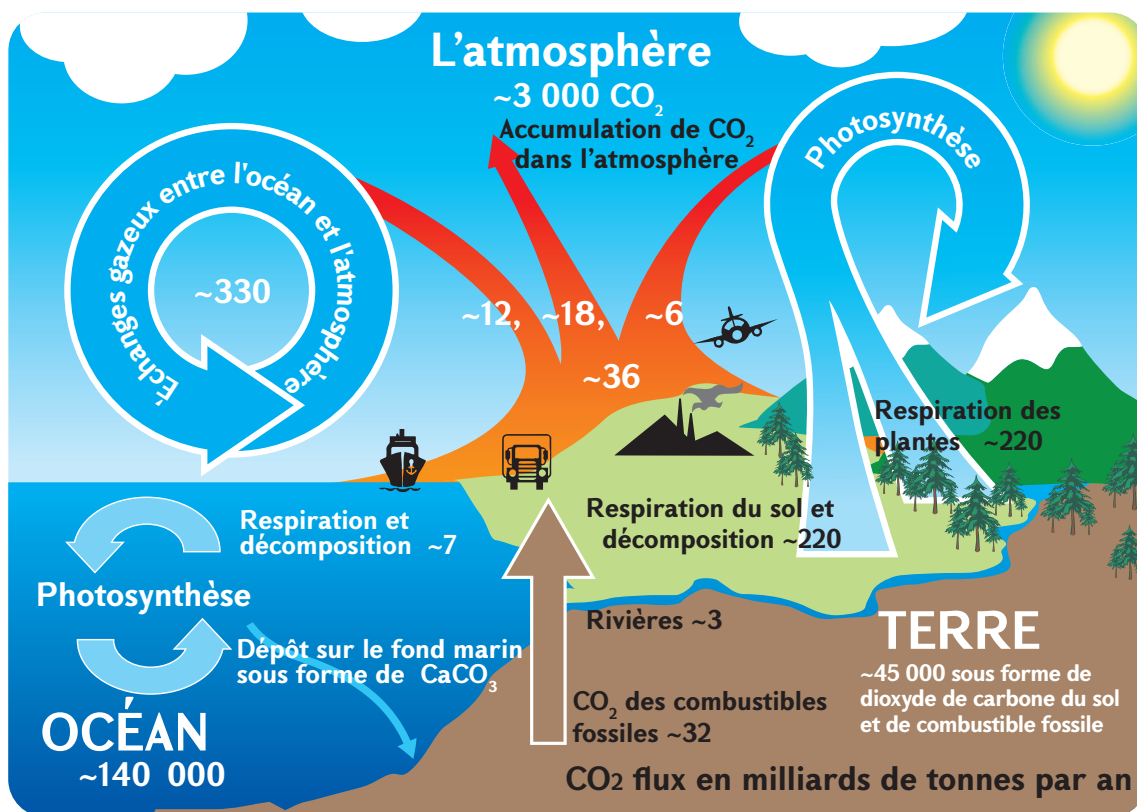
L'augmentation des concentrations de CO₂ est-elle due uniquement à l'activité humaine ou est-ce un processus naturel ?

Les processus naturels tels que la respiration des organismes vivants, la décomposition, les échanges océaniques, l'activité volcanique et les incendies de forêt libèrent du CO₂ dans l'atmosphère, jouant un rôle clé dans le cycle du carbone terrestre (Fig. 1.4.4). Cependant l'analyse isotopique révèle que la récente augmentation du CO₂ atmosphérique provient principalement des activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles, dont la composition moléculaire est nettement différente du CO₂ libéré par ces processus naturels.

ANALYSE ISOTOPIQUE

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

Figure 1.4.4 Cycle du CO₂ dans la nature



Les océans, les forêts et les sols composant notre planète « viennent en aide » à l'homme en absorbant près de la moitié de tout le 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. 1.4.6). L'augmentation de la température moyenne mondiale entre 1850 et 2023 (Fig. 1.4.5) illustre la conclusion de l'OMM, basée sur les données des différents centre météorologiques, selon laquelle les neuf dernières années entre 2015 et 2023, ont été les années les plus chaudes jamais enregistrées. Une tendance similaire est observée dans les océans. L'homme a abattu une grande partie des forêts mondiales, réduisant ainsi leur capacité d'absorption du CO₂ présent dans l'atmosphère, nettement moindre que par le passé.

Figure 1.4.5

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

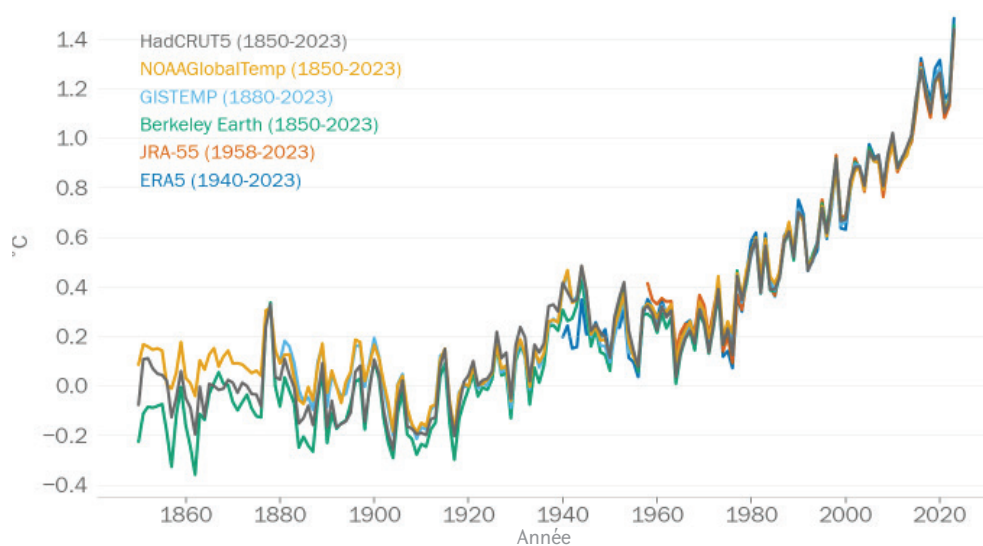
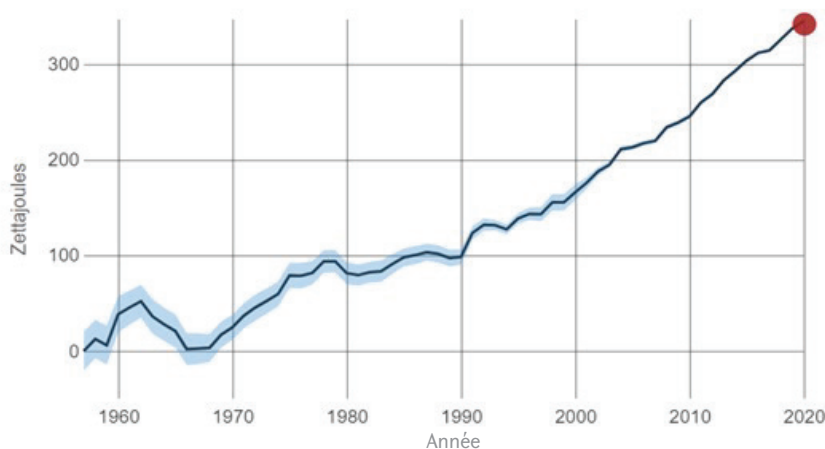


Figure 1.4.6

Augmentation du contenu thermique des océans du monde entre 1955 et 2020



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

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

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

Figure 1.4.7

Aérosols émis par des activités naturelles et humaines



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

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

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

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

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

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

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

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

Figure 1.4.8

Tatiana assise sur son lit. Hiver

Illustration du roman *Eugène Onéguine*, réalisée par Belyukin/Russie, 1999

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

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

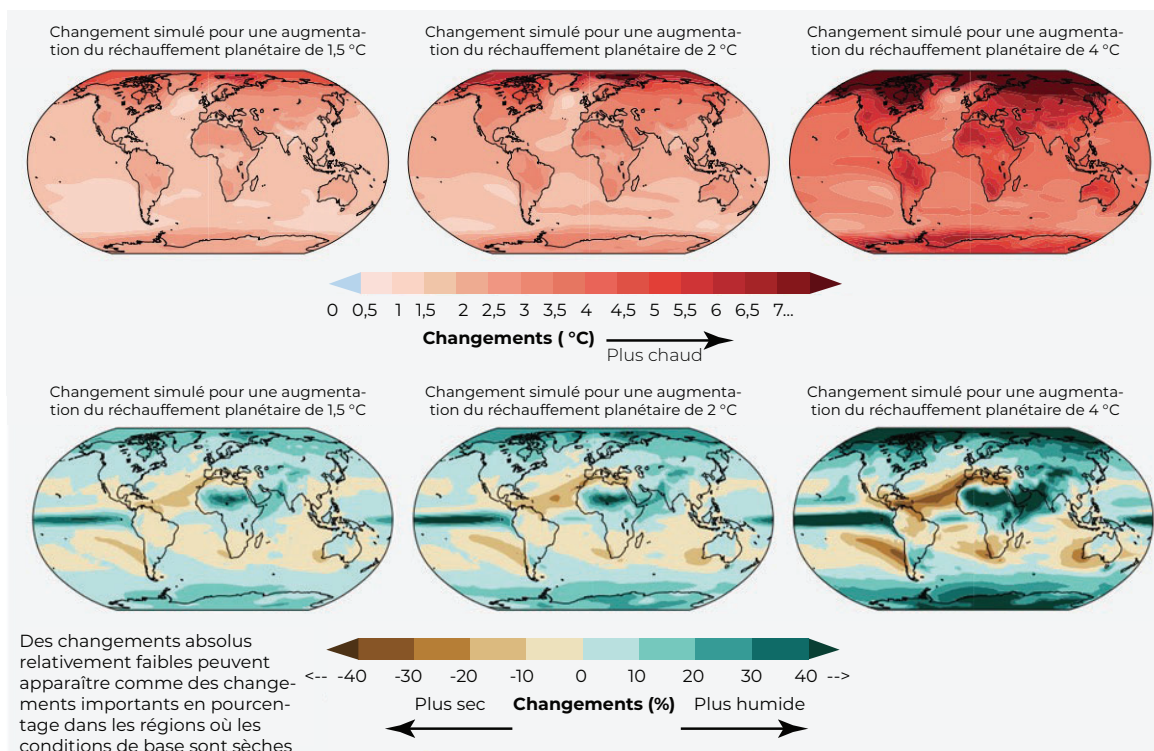
À l'aide de modèles informatiques prenant en compte l'ensemble des effets (aussi bien naturels que provoqués par l'homme), les climatologues sont en mesure non seulement d'expliquer ce qui se passe aujourd'hui, mais également de fournir des prévisions pour l'ensemble du XXI^e siècle. Selon le niveau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

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

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

Figure 1.4.9

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



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

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



QUESTIONS

1

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

—

2

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

—

3

La hausse des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère est-elle due à des causes naturelles ou à l'activité humaine ? Comment cela a-t-il été démontré ?

—

4

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

—

5

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





EXERCICES



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

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

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

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

