

Extraits du Rapport accepté par le Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat mais non approuvé dans les détails

Questions fréquentes

Citations des présentes questions :

Les présentes questions ont été directement reprises du rapport sous-jacent et réunies dans le document présent. Lors de la citation de questions spécifiques, donner la référence du chapitre correspondant du rapport d'où est tirée la question.

Lors de la citation d'un groupe de questions, donner la référence suivante :

GIEC, 2007 : Changements climatiques 2007 - Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (éds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, NY, États-Unis.

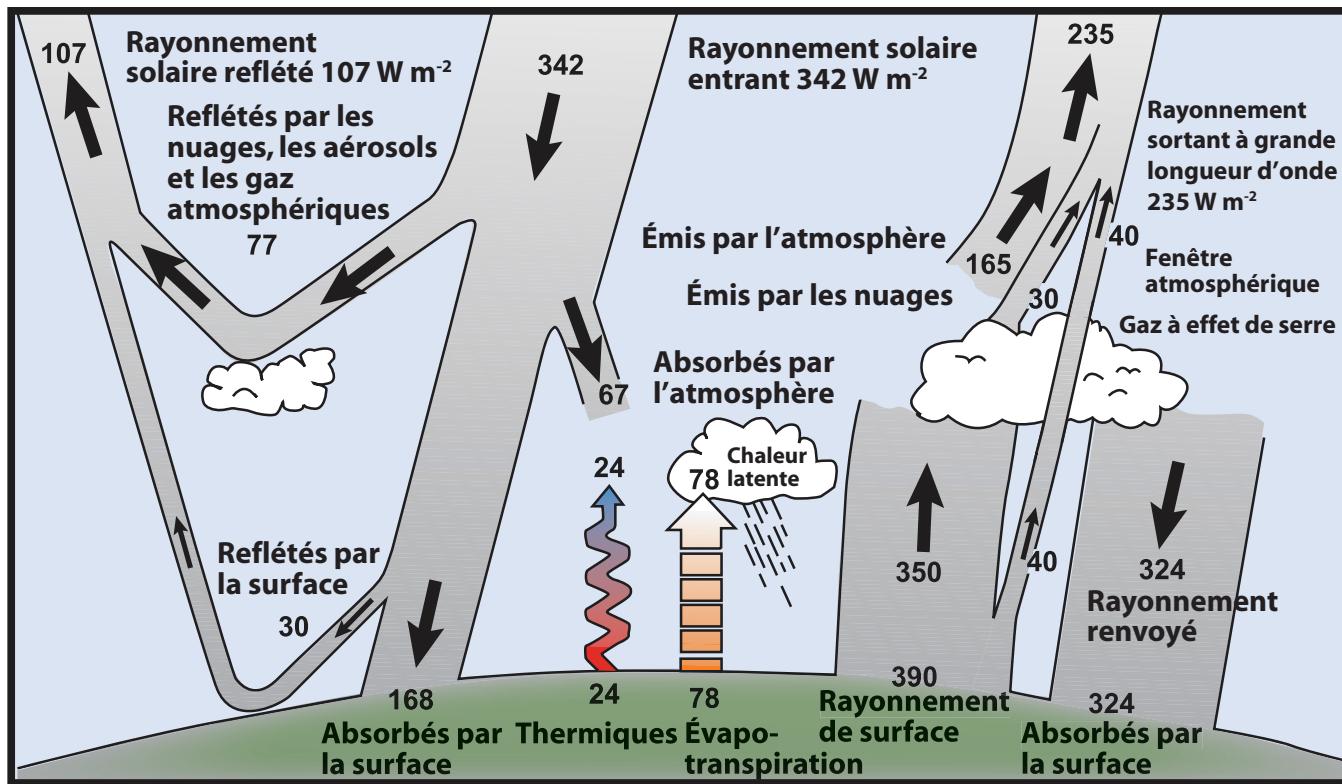
QUESTION FRÉQUENTE 1.1

Quels sont les facteurs qui déterminent le climat de la Terre ?

Le système climatique est un système complexe et interactif, dont les éléments sont l'atmosphère, la surface terrestre, la neige et la glace, les océans et autres plans d'eau, ainsi que les êtres vivants. De toute évidence, l'atmosphère est l'élément du système climatique qui conditionne le climat ; le climat est souvent défini comme « le temps moyen ». Le climat est généralement décrit en termes de moyennes et de variabilités des températures, des précipitations et des vents pendant une période allant de quelques mois à plusieurs millions d'années (la période type étant de 30 ans). Le système climatique évolue avec le temps sous l'influence de sa propre dynamique interne, mais dépend également de facteurs externes qui affectent le climat (les « forçages »). Les forçages externes comprennent des phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques et les variations du rayonnement solaire, ainsi que des modifications de la composition atmosphérique imputables à l'homme. Le système climatique est activé par le rayonnement solaire. L'équilibre du rayonnement sur la Terre peut

être modifié de trois manières fondamentales : 1) modification du rayonnement solaire entrant (occasionné par exemple par des variations au niveau de l'orbite terrestre ou du Soleil lui-même) ; 2) modification de la fraction réfléchie du rayonnement solaire (« l'albédo » ; par exemple par des changements au niveau de la couverture nuageuse, des particules atmosphériques ou de la végétation) ; et 3) modification du rayonnement cosmique à grande longueur d'onde émis par la Terre vers l'espace (par exemple par les variations des concentrations de gaz à effet de serre). Le climat réagit à ces modifications directement et indirectement par divers mécanismes de rétroaction.

La quantité d'énergie qui atteint la couche supérieure de l'atmosphère terrestre chaque seconde par mètre carré de surface faisant face au soleil pendant la période diurne représente environ 1 370 watts, tandis que la quantité d'énergie moyenne par mètre carré par seconde à l'échelle planétaire n'en représente qu'un quart (voir figure 1). Environ 30 % de la lumière solaire qui atteint



FAQ 1.1, Figure 1. Estimation de la moyenne annuelle et mondiale du bilan énergétique de la Terre. À long terme, la quantité de rayonnement solaire entrant absorbé par la Terre et par l'atmosphère s'équilibre grâce à la Terre et à l'atmosphère qui dégagent une quantité équivalente de rayonnement sortant à grande longueur d'onde. Près de la moitié du rayonnement solaire entrant est absorbé par la surface de la Terre. Cette énergie est retransmise vers l'atmosphère grâce au réchauffement de l'air à la surface (les thermiques) ou par l'évapotranspiration, ainsi que par les rayonnements à grande longueur d'onde qui sont absorbés par les nuages et les gaz à effet de serre. À son tour, l'atmosphère renvoie l'énergie à grande longueur d'onde vers la Terre, ainsi que vers l'espace. Source : Kiehl et Trenberth (1997).

les couches supérieures de l'atmosphère est réfléchi vers l'espace. Environ les deux tiers de cette réflectivité proviennent des nuages et des petites particules de l'atmosphère connues sous le nom d'« aérosols ». Le dernier tiers de la lumière du soleil est réfléchi par les zones de la surface terrestre de couleur claire – principalement la neige, la glace, et les déserts. L'altération de la réflectivité produite par les aérosols est la plus spectaculaire lorsque d'importantes éruptions volcaniques projettent des matériaux très haut dans l'atmosphère. En règle générale, les aérosols sont éliminés de l'atmosphère par la pluie en une ou deux semaines, mais lorsque des matériaux sont expulsés par une éruption volcanique violente bien au dessus des plus hauts nuages, ces aérosols ont tendance à affecter le climat pendant un an ou deux, avant de retomber dans la troposphère et d'être entraînés vers la surface par les précipitations. Ainsi, les plus grosses éruptions volcaniques peuvent-elles provoquer pendant des mois, voire des années, un abaissement de la température moyenne à la surface du globe d'environ un demi-degré Celsius. Certains aérosols d'origine anthropique reflètent aussi considérablement la lumière du soleil.

L'énergie qui n'est pas renvoyée vers l'espace est absorbée par la surface de la Terre et par l'atmosphère. Elle représente environ 240 watts par mètre carré (W/m^2). Afin de compenser l'énergie entrante, la Terre elle-même doit émettre vers l'espace une quantité moyenne équivalente d'énergie. Elle le fait en émettant un rayonnement à grande longueur d'onde. Tout sur Terre émet en permanence des rayonnements à grande longueur d'onde. C'est l'énergie thermique que l'on ressent en s'approchant d'un feu ; plus l'objet est chaud plus il émet d'énergie thermique. Pour émettre 240 watts par m^2 , une surface doit être à une température d'environ -19°C . Température beaucoup plus froide que celle qui prévaut à la surface de la Terre (la température moyenne de la surface du globe est d'environ 14°C). La température requise de -19°C se trouve à une altitude de 5 km environ au dessus du sol.

Cette chaleur à la surface de la Terre est due à la présence de gaz à effet de serre qui opacifient partiellement les rayonnements à grande longueur d'onde provenant de cette surface. Cette opacification est connue sous le nom d'effet de serre naturel. Les gaz à effet de serre les plus importants sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. Les deux éléments prépondérants dans l'atmosphère – l'azote et l'oxygène – n'ont pas cet effet. Par ailleurs, les nuages agissent comme un écran, semblable à celui qui est produit par les gaz à effet de serre ; cependant, cette opacité est compensée par le pouvoir de réflexion des nuages qui ont plutôt tendance à refroidir le climat (bien que le réchauffement puisse se faire ressentir localement : les nuits nuageuses sont plus chaudes que les nuits claires, car la couverture nuageuse renvoie le rayonnement à grande longueur d'onde vers la surface de la Terre). L'effet écran est encore renforcé par le dégagement des gaz à effet de serre dus aux activités humaines. Par exemple, le dioxyde de carbone atmosphérique a augmenté d'environ 35% pendant l'ère industrielle et on sait que cette augmentation est due aux activités humaines, en particulier à la combustion des combustibles fossiles et au déboisement. L'homme a donc radicalement modifié la composition chimique de l'atmosphère du globe, ce qui a eu des conséquences

considérables sur le climat.

Puisque la Terre est une sphère, les régions tropicales reçoivent plus d'énergie solaire en une surface donnée que les régions situées à de latitudes plus élevées, où la lumière du soleil frappe l'atmosphère sous un angle plus aigu. Les courants atmosphériques et océaniques, y compris les systèmes dépressionnaires, transportent l'énergie depuis les zones équatoriales vers des latitudes plus élevées. L'évaporation de l'eau de mer ou de la surface de la Terre nécessite également de l'énergie ; cette énergie, appelée chaleur latente, se dégage lorsque la vapeur d'eau se condense pour former des nuages (voir figure 1). La circulation atmosphérique est principalement régie par le dégagement de cette chaleur latente. A son tour, elle exerce une action considérable sur les courants océaniques par l'action des vents à la surface des océans et par les variations de température à la surface de l'eau, ainsi que par la modification de la salinité qui dépend des précipitations et de l'évaporation.

La rotation de la Terre fait que la circulation atmosphérique est plutôt orientée d'est en ouest que du nord au sud. Sous des latitudes moyennes, les vents d'ouest forment de vastes systèmes météorologiques qui entraînent la chaleur vers les pôles. Ces systèmes météorologiques mouvants sont connus sous le nom de systèmes de basses et hautes pressions, accompagnés des fronts froids et chauds qui leurs sont associés. Bien qu'à l'échelle planétaire, l'amplitude des vagues atmosphériques du système de circulation puisse évoluer avec le temps, elle se limite normalement aux continents et aux montagnes du fait des contrastes entre les températures des terres et celles des océans et de la présence d'obstacles tels que les chaînes de montagnes et les nappes glaciaires.

En raison de la structure des vagues, un hiver particulièrement froid en Amérique du Nord peut être lié à un hiver particulièrement chaud ailleurs dans l'hémisphère. Des changements divers dans le système climatique, par exemple l'étendue des nappes glaciaires, le genre et la répartition de la végétation, ou encore la température de l'atmosphère et des océans, peuvent avoir une influence sur les caractéristiques générales des courants atmosphériques et océaniques.

Les systèmes climatiques comprennent de nombreux mécanismes de rétroaction capables d'amplifier (rétroaction positive) ou d'atténuer (rétroaction négative) les effets d'une variation dans le forçage climatique. Par exemple, la concentration accrue de gaz à effet de serre réchauffe le climat de la Terre et entraîne la fonte des neiges et des glaces. Cette fonte révèle des terres plus sombres et des surfaces aquatiques qui se trouvaient jusque là sous la neige et la glace. Ces surfaces plus sombres absorbent davantage la chaleur du soleil, ce qui entraîne un réchauffement accru qui lui-même entraîne la fonte, et ainsi de suite en cycles répétitifs. Cette rétroaction en boucle, connue sous le nom de « Rétroaction glace – albédo », amplifie le réchauffement initial provoqué par l'élévation du niveau des concentrations de gaz à effet de serre. La détection, la compréhension et la quantification des rétroactions climatiques ont été au centre de nombreuses recherches scientifiques ayant pour but d'élucider les complexités du climat terrestre.

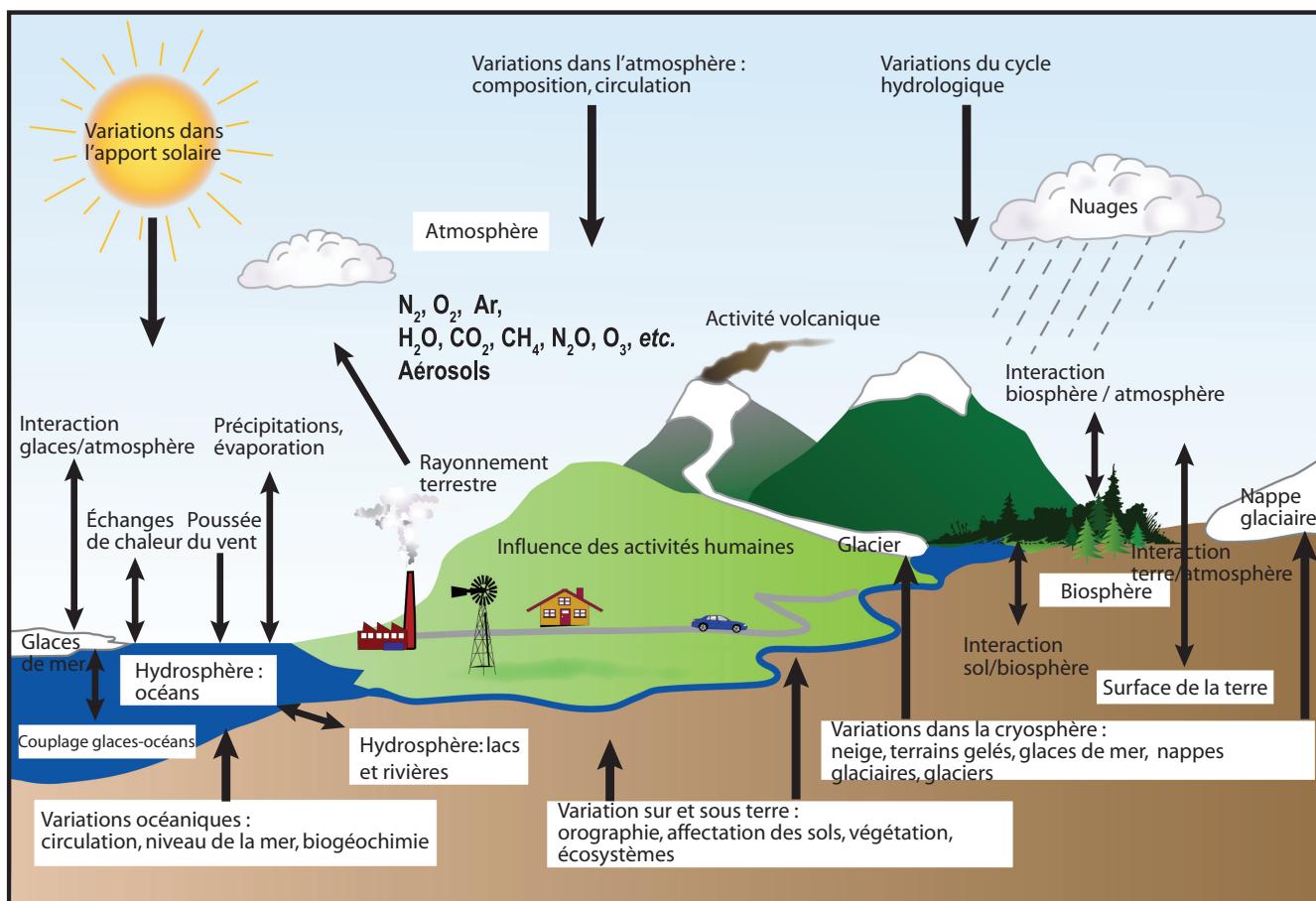
QUESTION FRÉQUENTE 1.2

Quelle est la relation entre le changement climatique et le temps qu'il fait ?

Par climat, on entend généralement le temps qu'il fait en moyenne ; le changement climatique et le temps sont donc étroitement liés. Des observations permettent de montrer que des changements météorologiques se sont produits et c'est grâce aux statistiques portant sur ces changements météorologiques dans le temps que l'on peut constater le changement climatique. Bien que le temps et le climat soient étroitement liés, ces deux notions sont très différentes. Une confusion apparaît fréquemment entre le temps et le climat lorsqu'on demande aux scientifiques comment ils peuvent prédire le climat qu'il fera dans 50 ans alors qu'ils sont incapables de prévoir le temps qu'il fera dans quelques semaines. La nature chaotique de la météo la rend imprévisible au-delà de quelques jours. Prévoir des changements climatiques (donc la météo moyenne à long terme) liés aux modifications des constituants atmosphériques ou à d'autres facteurs, représente un travail différent et beaucoup plus gérable. À titre de comparaison, s'il est im-

possible de prédire l'âge du décès d'un homme, on peut affirmer avec une confiance élevée que l'âge moyen de la mortalité masculine dans les pays industrialisés se situe vers 75 ans. On se trompe également souvent en supposant qu'un hiver froid, ou un site qui se refroidit localement, témoigne de l'absence de réchauffement planétaire. Il y a toujours des extrêmes de chaleur et de froid, bien qu'en fréquence et en intensité ils puissent varier en fonction des changements climatiques. Pourtant, lorsqu'on établit des moyennes météorologiques dans le temps et dans l'espace, les données qui en résultent montrent un net réchauffement au niveau planétaire.

Les météorologues s'investissent beaucoup dans l'observation, la compréhension et la prédiction de l'évolution des systèmes météorologiques au quotidien. En se basant sur les lois physiques qui régissent les mouvements atmosphériques, provoquant le chaud, le froid, la pluie, la neige et l'évaporation de l'eau, les météoro-



FAQ 1.2, Figure 1. Représentation simplifiée des composantes du système climatique, leurs processus et interactions.

logues sont capables de prévoir avec succès le temps qu'il fera au cours des prochains jours. L'un des principaux facteurs limitant les prévisions météorologiques à quelques jours est la dynamique fondamentale propre à l'atmosphère. Dans les années 1960, le météorologue Edward Lorenz a découvert qu'il suffisait d'infimes différences dans les conditions initiales pour aboutir à des prévisions totalement différentes. C'est ce qu'on appelle l'effet papillon : le battement d'ailes d'un papillon (ou tout autre phénomène de faible envergure) à un endroit donné peut, en théorie, avoir des conséquences considérables sur la météo dans un endroit éloigné. Au cœur de l'effet papillon se trouve la théorie du chaos, selon laquelle des modifications insignifiantes de certaines variables peuvent altérer de façon aléatoire des systèmes complexes.

Cependant la théorie du chaos n'implique pas une absence d'ordre totale. Par exemple, de légères différences dans les conditions de la formation d'un système dépressionnaire peuvent modifier le moment de son impact ou le tracé exact de son déplacement, sans que la température moyenne et les précipitations (donc le climat) dans cette région aient changé pendant cette période. L'un des problèmes des prévisions météorologiques est qu'il faudrait pouvoir disposer de tous les facteurs au début de la période des prévisions, en conséquence il serait plus judicieux de considérer le climat en termes de conditions préalables à la météo. Plus précisément, on peut dire du climat qu'il concerne l'ensemble du système terrestre : l'atmosphère, les terres, les océans, la neige, la glace, ainsi que les êtres vivants (voir figure 1), qui sont les éléments de base des structures météorologiques mondiales. Prenons pour exemple un phénomène El Niño qui affecterait le temps le long des côtes du Pérou. El Niño impose ses limites à l'évolution probable de structures météorologiques, élaborées sur la base d'effets aléatoires. La Niña imposerait des limites différentes.

Un autre exemple est celui du contraste familier entre l'été et l'hiver. La danse des saisons résulte des changements dans les

structures géographiques de l'énergie absorbée et rejetée par le système terrestre. De même, la forme que prennent les projections des climats futurs est déterminée par les modifications radicales de l'énergie thermique dans le système terrestre et, en particulier, par l'intensité croissante des effets de serre qui emprisonnent la chaleur près de la surface de la Terre, intensité déterminée par la quantité de dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre atmosphériques. Prévoir les changements climatiques qui auront lieu dans 50 ans en raison des variations en matière de gaz à effet de serre représente une tâche bien différente et bien plus facile à accomplir que prédire le temps qu'il fera dans quelques semaines. Autrement dit, les variations à long terme dues à la modification des composants atmosphériques sont beaucoup plus prévisibles que des phénomènes météorologiques isolés. Ainsi, s'il nous est impossible de prédire sur quelle face retombera une pièce de monnaie ou un dé à jouer pour un lancer unique, sur plusieurs lancers, il est statistiquement possible d'en envisager les probabilités.

Parmi les nombreux facteurs qui continuent à influencer le climat, les scientifiques ont constaté la prédominance des activités humaines, qui sont les principales responsables du réchauffement observé au cours des 50 dernières années. Le changement climatique dû à des facteurs anthropiques résulte essentiellement des variations de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais aussi des modifications des petites particules (aérosols), et des changements dans l'affectation des terres, par exemple. La probabilité que tel ou tel événement météorologique se produise est influencée par le changement climatique. Par exemple, puisque la température moyenne de la Terre s'est élevée, certains phénomènes météorologiques ont crû en fréquence et en intensité (notamment les vagues de chaleur et les précipitations intenses), tandis que d'autres sont devenus plus rares et ont perdu en intensité (notamment les froids extrêmes).

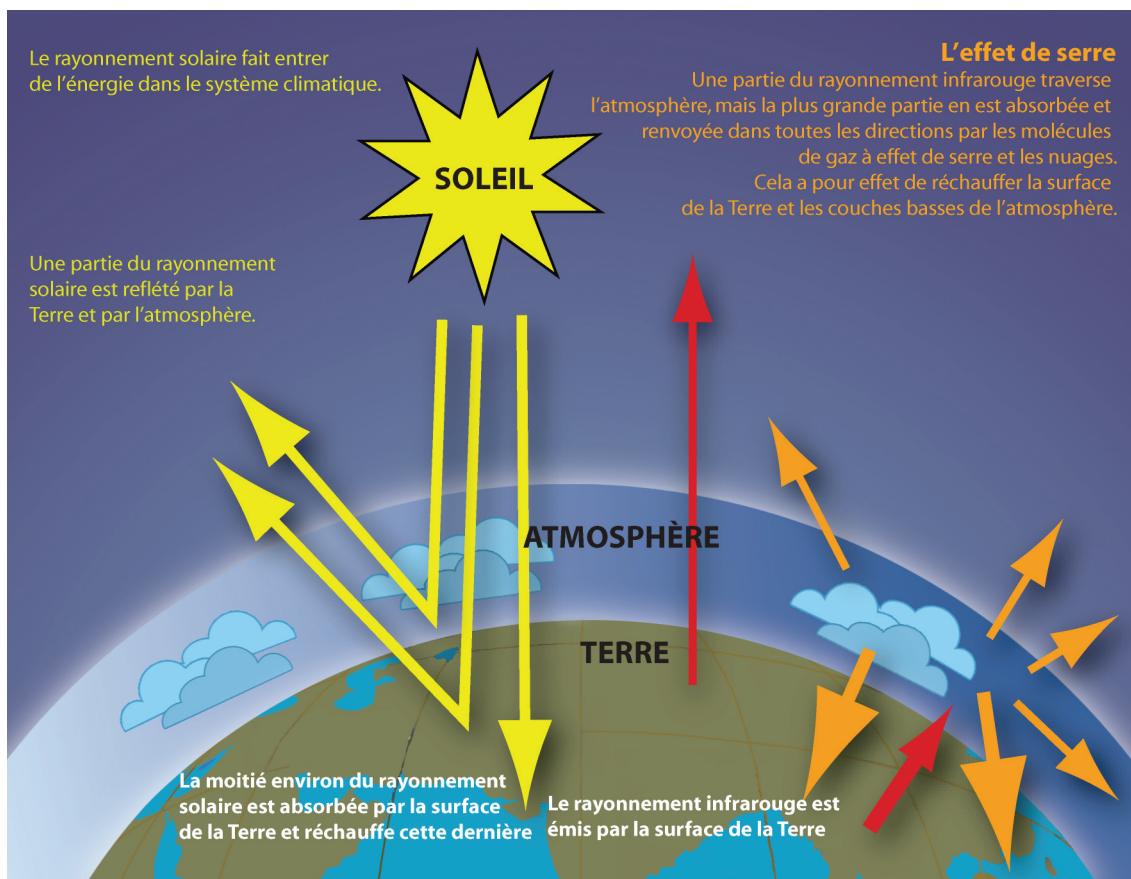
QUESTION FRÉQUENTE 1.3

Qu'est-ce que l'effet de serre ?

Le soleil détermine le climat de la Terre en émettant de l'énergie sous la forme d'ondes très courtes, principalement dans la partie visible ou quasi visible du spectre (par ex., les rayons ultraviolets). Dans l'ensemble, un tiers de l'énergie solaire qui atteint les couches supérieures de l'atmosphère est directement renvoyé vers l'espace. Les deux tiers restants sont absorbés par la surface et, à un degré moindre, par l'atmosphère. Pour compenser l'énergie entrante, la Terre doit renvoyer, en moyenne, une quantité équivalente d'énergie vers l'espace. Puisque la Terre est beaucoup plus froide que le soleil, son rayonnement se propage en ondes beaucoup plus longues, principalement dans la portion infrarouge du spectre (voir figure 1). La plus grande partie de ce rayonnement thermique émis par la Terre et l'océan est absorbée par l'atmosphère, notamment par les nuages, puis elle est réfléchie de nouveau vers la Terre. C'est l'effet de serre. Les parois vitrées d'une serre affaiblissent les courants d'air et augmentent la température de l'air à l'intérieur. Il en va de même sur Terre, mais le mécanisme physique en est différent : l'effet de serre sur Terre réchauffe la surface de la

planète. Sans l'effet de serre naturel, la température moyenne sur Terre serait en-dessous du point de congélation de l'eau. L'effet de serre naturel rend ainsi possible la vie telle que nous la connaissons. Cependant, les activités humaines, en particulier l'utilisation de combustibles fossiles et le déboisement, ont fortement contribué à intensifier l'effet de serre naturel, provoquant le réchauffement de la planète.

Les deux gaz prédominants de l'atmosphère, l'azote (78% de l'atmosphère sèche) et l'oxygène (21%) ne génèrent pratiquement pas d'effet de serre. Ce dernier est produit par des molécules plus complexes et plus rares. Le gaz à effet de serre prédominant est la vapeur d'eau, suivi par le dioxyde de carbone (CO_2). Le méthane, l'oxyde nitreux, l'ozone et quelques autres gaz présents dans l'atmosphère en faibles quantités contribuent également à l'effet de serre. Dans les régions équatoriales humides, où l'air est saturé de vapeur d'eau, l'effet de serre est considérable ; y ajouter une faible quantité de CO_2 ou de vapeur d'eau n'aura qu'un impact direct négligeable sur le rayonnement infrarouge dirigé vers la Terre. En



FAQ 1.3, Figure 1. Représentation simplifiée de l'effet de serre naturel. Lire les explications dans le texte.

revanche, une augmentation, même légère, de CO₂ ou de vapeur d'eau dans les régions polaires, froides et sèches aura des conséquences plus importantes. De même, une faible augmentation de vapeur d'eau dans les couches supérieures de l'atmosphère, froides et sèches, aura plus d'impact sur l'effet de serre que l'augmentation du même volume de vapeur d'eau en surface.

Certains composants du système climatique, notamment les océans et les êtres vivants, affectent les concentrations de gaz à effet de serre atmosphériques. Les plantes qui captent le CO₂ de l'atmosphère par photosynthèse et le transforment (ainsi que l'eau) en hydrates de carbone, en sont un exemple frappant. Depuis le début de l'ère industrielle les activités humaines ont contribué à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, principalement en brûlant des combustibles fossiles et en déboisant les forêts.

Ajouter davantage de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, comme du CO₂, intensifie l'effet de serre, réchauffant ainsi le climat de la Terre. L'importance du réchauffement dépend de divers mécanismes de rétroaction. Par exemple, à mesure que l'atmosphère se réchauffe du fait de l'augmentation de sa teneur en gaz à effet de serre, sa concentration en vapeur d'eau augmente, inten-

sifiant encore plus l'effet de serre, ce qui entraîne encore plus de réchauffement, qui à son tour dégage encore plus de vapeur d'eau, et ainsi de suite, en un cycle qui se renforce lui-même. Cet effet de rétroaction de la vapeur d'eau peut être suffisamment fort pour doubler l'augmentation de l'effet de serre provoquée par l'ajout du seul CO₂.

Les nuages constituent un autre élément important des mécanismes de rétroaction. Ils servent à absorber les rayons infrarouges, créant un effet de serre important et, de ce fait, réchauffant la planète. Ils réfléchissent également les rayons solaires, refroidissant ainsi la Terre. Tout changement dans la nébulosité – la forme des nuages, leur localisation, leur teneur en eau, leur altitude, les dimensions et les types de particules qui les constituent ou encore leur temps de rémanence – peut affecter leur influence sur le réchauffement ou le refroidissement de la Terre. Certains changements amplifient le réchauffement, d'autres l'atténuent. De nombreuses recherches sont en cours pour mieux comprendre comment les nuages réagissent au réchauffement climatique et comment ces changements peuvent à leur tour affecter le climat par le biais de divers mécanismes de rétroaction.

QUESTION FRÉQUENTE 2.1

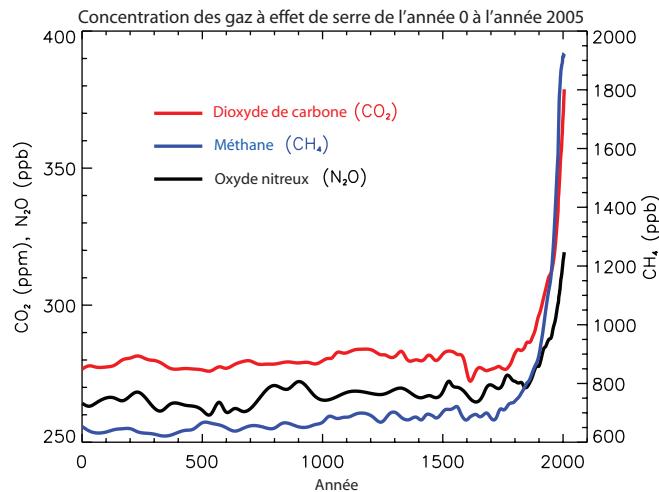
Quelle est la part des activités humaines dans les changements climatiques par rapport aux facteurs naturels ?

Les activités humaines contribuent au changement climatique en ce qu'elles transforment l'atmosphère terrestre en modifiant les quantités de gaz à effet de serre et d'aérosols (minuscules particules), et en altérant la nébulosité. Le plus important facteur déterminant connu est la combustion des combustibles fossiles qui dégagent du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les gaz à effet de serre, ainsi que les aérosols, affectent le climat en altérant le rayonnement solaire entrant et le rayonnement infrarouge (thermique) sortant, qui font partie de l'équilibre énergétique de la Terre. La modification de la densité ou des propriétés de ces gaz et particules dans l'atmosphère peut entraîner un réchauffement ou un refroidissement du système climatique. Depuis le début de la révolution industrielle (vers 1750), l'ensemble des activités humaines a provoqué le réchauffement du climat. L'impact anthropique sur le climat durant cette période excède de loin celui des processus naturels, tels que les éruptions solaires et volcaniques.

Gaz à effet de serre

Les activités humaines sont à l'origine de l'émission des quatre principaux gaz à effet de serre: le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et les halocarbures (groupe de gaz comprenant le fluor, le chlore et le brome). Ces gaz s'accumulent dans l'atmosphère avec une concentration croissante au fil du temps. La concentration de tous ces gaz s'est fortement accrue pendant l'ère industrielle (voir figure 1) et elle est entièrement imputable aux activités humaines.

- Le dioxyde de carbone a augmenté à cause de l'utilisation des combustibles fossiles dans les transports, le chauffage et la climatisation des bâtiments, ainsi que par les cimenteries et autres industries. Le déboisement dégage du CO_2 et diminue son absorption par les plantes. Des processus naturels, tels que la décomposition des matières végétales, dégagent également du dioxyde de carbone.
- L'augmentation du méthane est aussi due à l'activité humaine dans les domaines de l'agriculture, de la distribution du gaz naturel et de l'enfouissement des déchets. Le méthane se dégage naturellement, entre autres, dans des zones humides. Du fait de la diminution des taux de croissance au cours des deux dernières décennies, les concentrations de méthane dans l'atmosphère sont restées stables.
- Les émissions d'oxyde nitreux peuvent également être de source anthropique : utilisation d'engrais et combustion de combustibles fossiles. Le N_2O est aussi naturellement émis par les sols et les océans.
- Les concentrations accrues de halocarbures sont principalement dues à l'activité humaine, mais aussi, dans une mesure moindre, à des processus naturels. Les principaux gaz halocarbonés



FAQ 2.1, Figure 1. Concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre de longue durée, depuis 2000 ans. Leur augmentation depuis l'ère industrielle (vers 1750) est d'origine humaine. Les unités de concentration sont exprimées en parties par million (ppm) ou en parts par milliard (ppb). Elles indiquent le nombre de molécules de gaz à effet de serre dans un échantillon atmosphérique donné par million ou milliard de molécules d'air, respectivement. (Combinaison simplifiée des données énoncées aux chapitres 6 et 2 du présent rapport).

comprennent les chlorofluorocarbures (p. ex. les CFC- 11 et les CFC- 12), massivement utilisés dans le passé comme agents réfrigérants et dans d'autres procédés industriels, jusqu'à ce qu'on s'aperçoive que leur présence dans l'atmosphère provoquait l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. La quantité des chlorofluorocarbures est en train de décroître suite aux réglementations internationales visant à protéger la couche d'ozone.

• L'ozone est un gaz à effet de serre qui est produit et détruit en permanence dans l'atmosphère par des réactions chimiques. Les activités humaines ont augmenté la concentration d'ozone dans la troposphère par des émanations de gaz tels que le monoxyde de carbone, les hydrocarbures ou l'oxyde d'azote, dont la réaction chimique produit de l'ozone. Comme mentionné ci-dessus, les halocarbures d'origine anthropique détruisent l'ozone stratosphérique et ont provoqué le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique.

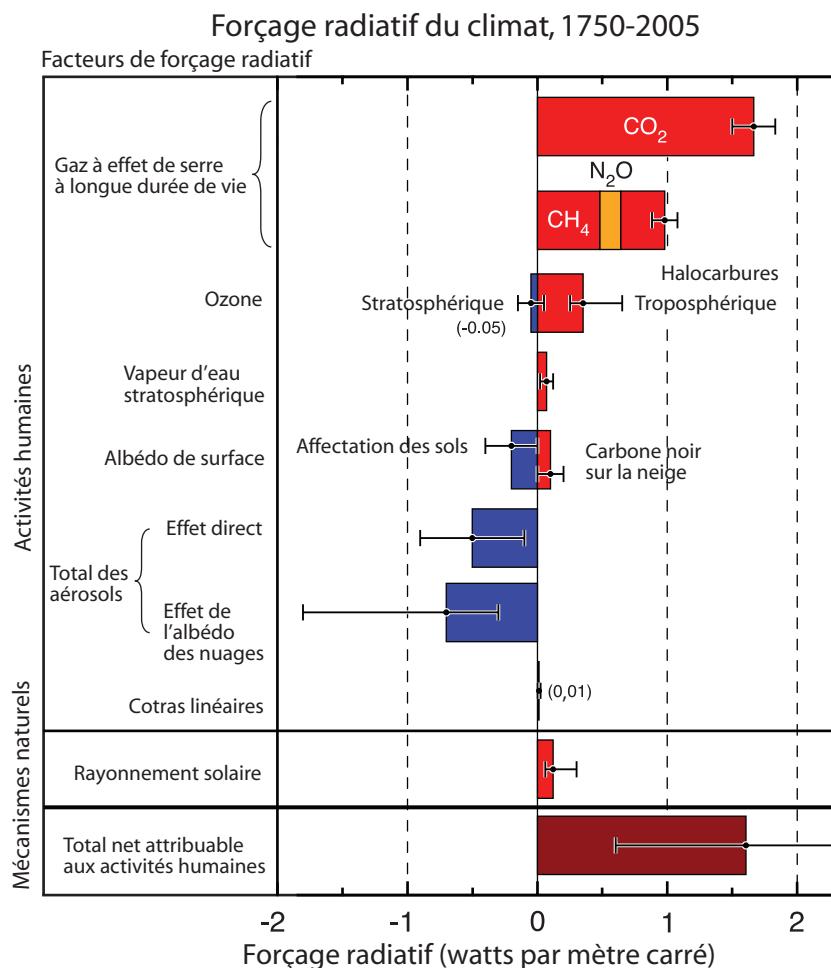
• Le plus important et le plus répandu des gaz à effet de serre atmosphériques est la vapeur d'eau. Sa quantité dans l'atmosphère dépend peu de l'influence directe des activités humaines. Toutefois, en modifiant le climat, l'homme est potentiellement capable d'agir considérablement sur la vapeur d'eau de manière indirecte. Par exemple, une atmosphère plus chaude contiendra davantage de vapeur d'eau. Les activités humaines agissent également sur la vapeur d'eau en émettant du CH_4 , car le CH_4 est chimiquement détruit dans la stratosphère en dégag-

eant une faible quantité de vapeur d'eau.

- Les aérosols sont de minuscules particules présentes dans l'atmosphère, dont la dimension, la concentration et la composition chimique sont fortement sujettes à variation. Certains aérosols sont émis directement dans l'atmosphère, tandis que d'autres se forment à partir de composants émis. Les aérosols contiennent à la fois les composants naturels et les composants anthropiques. La combustion des combustibles fossiles et de la biomasse ont fait augmenter la quantité d'aérosols contenant des composés sulfureux, des composés organiques et du carbone noir (suie). Les activités humaines telles que les exploitations minières à ciel ouvert et autres processus industriels ont provoqué l'augmentation des poussières dans l'atmosphère. Les aérosols naturels comprennent la poussière minérale provenant de la surface de la terre, les aérosols du sel des océans, les émissions biogéniques des sols et des océans, ainsi que les sulfates et la poussière provenant d'éruptions volcaniques.

Forçage radiatif des facteurs affectés par les activités humaines

La figure 2 illustre l'influence de certains agents anthropiques sur le forçage radiatif. Les valeurs indiquent le forçage total par rapport au début de l'ère industrielle (vers 1750). Les forçages résultant de l'augmentation de tous les gaz à effet de serre, les mieux compris parmi ceux qui sont d'origine anthropique, sont positifs puisque chaque gaz absorbe le rayonnement infrarouge émis vers l'atmosphère. Parmi les augmentations des gaz à effet de



FAQ 2.1, Figure 2. Résumé des principaux éléments du forçage radiatif du changement climatique. Tous ces forçages radiatifs ont pour origine un ou plusieurs facteurs qui affectent le climat et sont associés à des activités humaines ou à des processus naturels étudiés dans le corps du texte. Les valeurs représentent les forçages entre le début de l'époque industrielle (vers 1750) et 2005. Les activités humaines sont à l'origine de changements significatifs dans les gaz de longue durée de vie, l'ozone, la vapeur d'eau, l'albédo de surface, les aérosols et les cotras. Le seul facteur naturel d'un accroissement sensible du forçage entre 1750 et 2005 a été le rayonnement solaire. Les forçages positifs ont tendance à réchauffer le climat, les forçages négatifs à le refroidir. Le fin trait noir rattaché à chaque barre de couleur représente le degré d'incertitude quant à la valeur correspondante (figure adaptée de la figure 2.20 du présent rapport).

FAQ 2.1, Encadré 1 : Qu'est-ce que le forçage radiatif ?

Qu'est-ce que le forçage radiatif ? L'influence de facteurs susceptibles de changer le climat, tels que les gaz à effet de serre, est souvent évaluée par rapport à son forçage radiatif. Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système Terre/atmosphère. Le terme « radiatif » est utilisé du fait que ces facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère. Cet équilibre radiatif contrôle la température à la surface de la planète. Le terme forçage est utilisé pour indiquer que l'équilibre radiatif de la Terre est en train d'être déstabilisé.

Le forçage radiatif est généralement quantifié comme « le taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère », et il est exprimé en « watts par mètre carré » (W/m², voir figure 2). Un forçage radiatif causé par un ou plusieurs facteurs est dit positif lorsqu'il entraîne un accroissement de l'énergie du système Terre/atmosphère et donc le réchauffement du système. Dans le cas inverse, un forçage radiatif est dit négatif lorsque l'énergie va en diminuant, ce qui entraîne le refroidissement du système. Les climatologues sont confrontés au problème ardu d'identifier tous les facteurs qui affectent le climat, ainsi que les mécanismes de forçage, de quantifier le forçage radiatif pour chaque facteur et d'évaluer la somme des forçages radiatifs pour un groupe de facteurs.

serre, celle du CO₂ a été la cause majeure du forçage au cours de cette période. L'augmentation de l'ozone troposphérique a également contribué au réchauffement, tandis que la diminution de l'ozone stratosphérique a contribué au refroidissement.

Les particules d'aérosols ont une influence directe sur le forçage radiatif car elles réfléchissent et absorbent le rayonnement solaire et les infrarouges dans l'atmosphère. Certains aérosols sont à l'origine de forçage positif, d'autres de forçage négatif. Le forçage radiatif direct, pour l'ensemble des aérosols, est négatif. Les aérosols sont également la cause indirecte d'un forçage radiatif négatif en ce qu'ils modifient les propriétés des nuages.

Depuis début de l'ère industrielle, les activités humaines ont altéré la nature de la végétation, notamment par des modifications apportées aux terres cultivées, aux pâturages et aux forêts. Elles ont également modifié les propriétés réfléchissantes de la glace et de la neige. Dans l'ensemble, on peut affirmer que, de nos jours, la surface de la Terre réfléchit davantage le rayonnement solaire en réponse à l'activité humaine. Il en résulte un forçage négatif.

Les avions laissent derrière eux des traînées persistantes de condensation (les « cotras ») au-dessus des zones suffisamment froides et humides. Les cotras sont une sorte de cirrus qui réfléchit les rayons du soleil et absorbe les infrarouges. Les traînées de condensation résultant du trafic aérien à l'échelle planétaire ont fait augmenter la nébulosité et sont la cause probable de légers forçages radiatifs positifs.

Forçage radiatif d'origine naturelle

Le forçage naturel est produit par des changements du rayonnement solaire ou par des éruptions volcaniques. L'activité solaire s'est progressivement renforcée au cours de l'ère industrielle, provoquant un léger forçage radiatif positif (voir figure 2). A cela s'ajoutent les changements cycliques dans le rayonnement solaire, dont la périodicité type est de 11 ans. L'énergie solaire chauffe directement le système climatique et peut également affecter la concentration de certains gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, tels que l'ozone stratosphérique. Les éruptions volcaniques explosives peuvent générer un forçage négatif de courte durée (2-3 ans) en augmentant temporairement la quantité d'aérosols sulfatés dans la stratosphère. La dernière éruption importante ayant eu lieu en 1991 (Mont Pinatubo), il n'y a pas actuellement d'aérosols volcaniques dans la stratosphère.

Les variations dans les estimations du forçage radiatif entre le moment présent et le début de l'ère industrielle imputable aux changements dans le rayonnement solaire et aux éruptions volcaniques sont très faibles si on les compare avec variations du forçage radiatif d'origine vraisemblablement anthropique. En conséquence, dans notre atmosphère actuelle, le forçage radiatif anthropique influence plus le changement climatique, tant présent que futur, que le forçage radiatif estimé qui résulte des variations que connaissent les mécanismes naturels.que connaissent les mécanismes naturels.

QUESTION FRÉQUENTE 3.1

Comment les températures sur Terre évoluent-elles ?

Les relevés des températures depuis les 157 dernières années montrent une hausse générale des températures de surface accompagnée d'importants contrastes régionaux. Pour ce qui est de la moyenne dans le monde, le siècle passé a subi un réchauffement qui s'est effectué en deux étapes : entre les années 1910 et les années 1940 : hausse d'environ $0,35^{\circ}\text{C}$; et hausse plus significative, d'environ $0,55^{\circ}\text{C}$, depuis les années 1970. La vitesse du réchauffement s'est considérablement accrue pendant les 25 dernières années, et sur les 12 dernières années, on compte 11 des 12 années les plus chaudes jamais enregistrées. Des observations à l'échelle planétaire, effectuées à la surface de la terre depuis la fin des années 1950, prouvent que la troposphère (jusqu'à une altitude de 10 km environ) s'est réchauffée un peu plus vite que la surface, tandis que la stratosphère (10-30 km) s'est sensiblement refroidie depuis 1979. Ceci correspond aux prévisions physiques et aux résultats fournis par la plupart des modèles. Le réchauffement planétaire est confirmé par le réchauffement des océans, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des glaciers, le recul des glaces de mer dans l'Arctique et celui du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord.

Aucun thermomètre ne saurait mesurer la température à l'échelle planétaire. Cependant, des relevés isolés, enregistrés quotidiennement sur terre par quelques milliers de stations, sont combinés à des milliers d'autres relevés effectués à la surface de la mer par des navires sillonnant les océans, afin de produire une estimation mensuelle mondiale de la température moyenne. Pour obtenir des données cohérentes sur son évolution temporelle, les analyses portent plutôt sur les anomalies (écart par rapport aux moyennes climatiques relevées sur chaque site), car celles-ci sont plus résistantes aux changements dans la disponibilité des données. Il est désormais possible d'utiliser ces mesures pour la période allant de 1850 à nos jours, bien que leur portée n'ait été que partielle pendant la seconde moitié du XIX^e siècle, bien meilleure après 1957, avec le début des relevés en Antarctique, et exhaustive depuis les années 1980, avec l'avènement des mesures par satellite.

En termes de moyenne planétaire, les températures de surface ont subi une hausse d'environ $0,74^{\circ}\text{C}$ au cours des cent dernières années (de 1906 à 2005 ; voir figure 1). Cependant, le réchauffement ne s'est pas produit uniformément, ni également selon les saisons et les régions. Il y a eu peu de changements entre 1850 et 1915, hormis quelques pointes dues à des variations naturelles, qui pourraient néanmoins également être dues à la médiocrité de l'échantillonnage. On note une hausse des températures ($0,35^{\circ}\text{C}$) par rapport à la moyenne planétaire entre les années 1910 et les années 1940, suivie d'un léger refroidissement ($0,1^{\circ}\text{C}$), puis un réchauffement rapide ($0,55^{\circ}\text{C}$) jusque vers la fin de 2006 (figure 1). Les années les plus chaudes de la série ont été 1998 et 2005 (statistiquement indiscernables), et 11 des 12 années les plus chaudes ont survenu au cours des 12 dernières années (de 1995 à 2006). Le réchauffement, en particulier depuis les années 1970, a été généralement plus fort sur terre que sur mer. Le réchauffement saisonnier a été légèrement plus fort en

hiver. Les villes et les zones urbaines subissent un réchauffement supplémentaire (on parle souvent d'effet d'ilot de chaleur urbaine), mais ce réchauffement est très localisé, et on tient compte de ses effets en excluant un maximum de sites affectés des données sur la température mondiale et en admettant une marge d'erreur plus grande (ligne gris clair de la figure).

Depuis 1901, quelques régions se sont refroidies, en particulier le nord de l'Atlantique Nord au sud du Groenland. Pendant cette période, le réchauffement maximal a touché les régions continentales d'Asie et les zones boréales de l'Amérique du Nord. Néanmoins, comme ce sont des régions à forte variabilité interannuelle, le signal le plus clair du réchauffement a été donné dans certaines régions de moyennes et basses latitudes, en particulier dans les zones océaniques tropicales. La carte du monde de gauche, en bas de la figure 1, représente la courbe des températures depuis 1979, et illustre, par les couleurs dans l'océan Pacifique, les zones de réchauffement et de refroidissement imputables au phénomène El Niño.

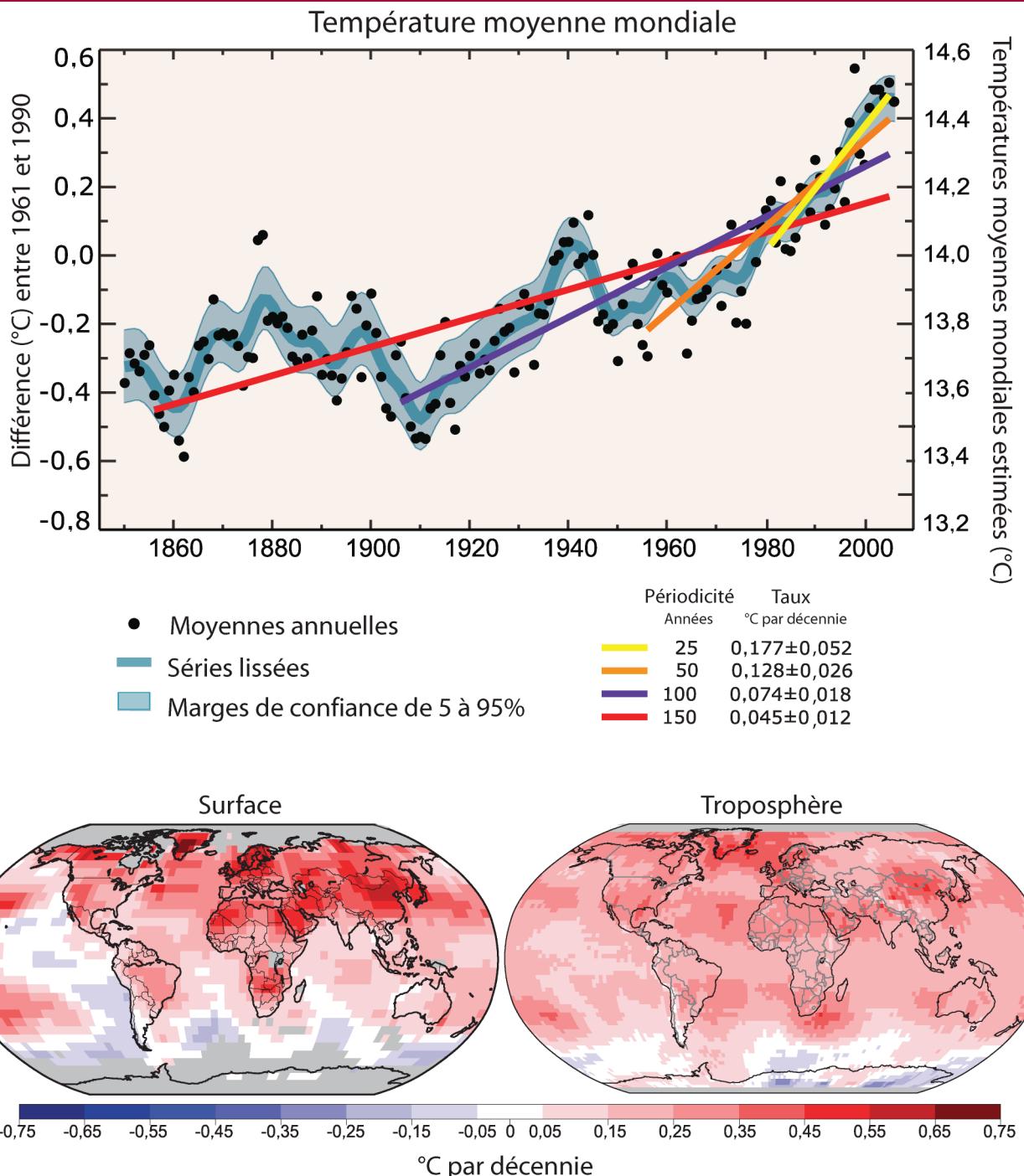
Dans de nombreuses régions du monde (certaines parties de l'Amérique du Nord et du sud de l'Amérique du Sud, en Europe, dans le nord et l'est de l'Asie, dans le sud de l'Afrique, ainsi qu'en Australasie), on peut désormais analyser les variations à long terme des pics quotidiens de température. Depuis les années 1950, notamment, ces relevés indiquent une diminution de journées et de nuits très froides, et une augmentation de journées caniculaires et de nuits chaudes (cf. FAQ 3.3). La durée des saisons hors gel s'est allongée dans la plupart des régions des deux hémisphères sous des latitudes moyennes et élevées. Dans l'hémisphère Nord, cela se manifeste surtout par un printemps précoce.

En plus des données de surface mentionnées ci-dessus, des ballons-sondes depuis 1958, relayés par les satellites depuis 1979, ont effectué des relevés de température en altitude, couvrant une grande partie du globe. Toutes les données sont adaptées pour pouvoir être utilisées, le cas échéant, par des instruments de mesure et méthodes d'observations modernisés. Pour établir des « relevés de température par satellite » dans les couches épaisses de l'atmosphère, y compris la troposphère (jusqu'à 10 km d'altitude) et la basse stratosphère (10-30 km), on a utilisé des données satellitaires à micro-ondes. Les tendances obtenues comportent encore une certaine marge d'incertitude malgré de nouvelles analyses basées sur un calibrage recoupé perfectionné des 13 instruments de mesure installés à bord de divers satellites depuis 1979, et malgré la compensation relative aux changements du temps observé par les satellites et de leur altitudes.

Pour ce qui est des observations à l'échelle planétaire depuis la fin des années 1950, les versions les plus récentes de tous les ensembles de données disponibles indiquent que la troposphère s'est réchauffée plus rapidement que la surface, tandis que la stratosphère s'est notablement refroidie depuis 1979. Ceci correspond aux projections physiques et aux résultats de la plupart des simulations, démontrant le rôle de l'augmentation des gaz à effet

de serre dans le réchauffement troposphérique et le refroidissement stratosphérique ; l'appauvrissement en ozone contribue aussi considérablement au refroidissement stratosphérique.

La hausse observée des températures en surface entraîne logiquement le raccourcissement des périodes de gel des lacs et des rivières. Par ailleurs, la masse et l'étendue glaciaires ont considérablement diminué dans le monde entier au cours du XX^e siècle ; la fonte de la calotte glaciaire du Groenland est devenue flétrissante ; l'enneigement a diminué dans de nombreuses régions de l'hémisphère Nord ; l'épaisseur et l'étendue des glaces de mer ont diminué dans l'Arctique en toutes saisons, en particulier au printemps et en été ; les océans se réchauffent et le niveau de la mer monte du fait de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaces continentales.



FAQ 3.1, Figure 1. (Graphique supérieur) Moyenne annuelle mondiale des températures relevées¹ (points noirs) avec ajustements simples par rapport aux données. L'axe vertical de gauche indique les anomalies par rapport aux moyennes des années 1961-1990, l'axe vertical de droite indique la température réelle estimée (en °C). Les ajustements des tendances linéaires indiquent les 25 (en jaune), 50 (en orange), 100 (en violet) et 150 (en rouge) dernières années, et correspondent aux périodes 1981-2005, 1956-2005, 1906-2005 et 1856-2005, respectivement. À noter que pour des périodes récentes plus courtes, la pente est plus raide, ce qui indique un réchauffement accéléré. La courbe de couleur bleue représente de manière lissée les variations décennales. Pour se rendre compte de l'importance des fluctuations, les marges d'erreur décennales allant de 5% à 95% (en gris pâle) suivent le contour de la courbe (de ce fait, les valeurs annuelles ne dépassent pas ces limites). Les résultats des modélisations climatiques obtenues par les forçages radiatifs estimés pour le XX^e siècle (chapitre 9) laissent à penser qu'il y a eu peu de changements avant environ 1915, et qu'une grande partie des changements survenus au début du XX^e siècle est due à des causes naturelles, dont le changement du rayonnement solaire, le volcanisme et la variabilité naturelle. Entre environ 1940 et 1970, le développement industriel croissant, consécutif à la Seconde Guerre mondiale, a fait augmenter la pollution dans l'hémisphère Nord, contribuant au refroidissement, tandis que l'accroissement des concentrations de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre ont été les facteurs dominants du réchauffement constaté à partir du milieu des années 1970. (Graphiques inférieurs) Structures des tendances linéaires des températures à l'échelle planétaire entre 1979 et 2005 ; estimations obtenues par satellite pour la surface (à gauche) et pour la troposphère (à droite) depuis la surface de la Terre jusqu'à une altitude de 10 km. Les zones en gris indiquent que les données sont incomplètes. À noter, un réchauffement plus uniforme dans l'espace, d'après les relevés satellitaires troposphériques, tandis que les variations de la température en surface concernent plus clairement les terres et les océans.

¹ Base de données HadCRUT3

QUESTION FRÉQUENTE 3.2

Comment les précipitations changent-elles ?

Les observations indiquent des changements se produisent dans l'amplitude, l'intensité, la fréquence et le type de précipitations. La variabilité naturelle de ces aspects des précipitations est généralement forte ; El Niño, ainsi que les modifications de la circulation atmosphérique typique, telle l'Oscillation nord-atlantique, ont une influence considérable. Entre 1900 et 2005, des tendances prononcées de longue durée ont été observées quant aux niveaux des précipitations dans certaines régions : considérablement plus élevés dans les zones orientales de l'Amérique du Nord et du Sud, au nord de l'Europe et en Asie du centrale et septentrionale, mais moindres au Sahel, dans l'Afrique australe, dans les régions méditerranéennes et en Asie du sud. Dans les régions nordiques, les précipitations arrivent de plus en plus souvent sous forme de pluie plutôt que de neige. Une hausse des événements de fortes précipitations a été observée à travers le monde entier, même dans des régions où, dans l'ensemble, elles ont décrue. Ces changements sont liés à l'augmentation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère résultant du réchauffement des océans, en particulier à de basses latitudes. Certaines régions voient également s'intensifier les sécheresses et les inondations.

Les précipitations sont un terme général pour désigner la pluie, la neige et les autres aspects sous lesquels l'eau tombe des nuages, sous forme solide ou liquide. Les précipitations sont intermittentes et leur caractère dépend en grande partie de la température et des conditions météorologiques. De ces dernières dépendent l'humidité transmise par les vents et par l'évaporation en surface, ainsi que la façon dont cette humidité s'assemble en nuages orageux. Les précipitations se forment lorsque la vapeur d'eau se condense, généralement dans de l'air ascendant qui se refroidit en se dilatant. Le mouvement ascendant provient de l'air s'élevant au dessus des montagnes, de l'air chaud qui passe par-dessus l'air plus froid (front chaud), de l'air froid repoussant l'air chaud vers le haut (front froid), de la convection de la chaleur irradiée depuis la surface et d'autres systèmes météorologiques et nébuleux. De ce fait, tout changement dans ces phénomènes agit sur les précipitations. Comme les cartes des précipitations sont souvent ponctuelles, les tendances générales des précipitations sont indiquées par l'indice de sévérité des sécheresses développé par Palmer (PDSI) (voir figure 1) qui mesure l'humidité des sols à partir des précipitations et des estimations brutes des changements dans le processus d'évaporation.

Une des conséquences du réchauffement accéléré provoqué par le renforcement de l'effet de serre d'origine anthropique, est une évaporation accrue, pour autant qu'il y ait suffisamment de surface humide (toujours présente au-dessus des océans et autres plans d'eau). Il en résulte que la surface humide agit en fait comme un « climatisateur », puisque la chaleur dépensée pour l'évaporation humidifie l'air au lieu de le chauffer. Une des conséquences visibles en est que les étés ont souvent tendance à être soit chauds et secs, soit frais et humides. Dans les régions orientales de l'Amérique du Nord et du Sud qui sont devenues plus humides (figure 1), les tem-

pératures ont donc moins augmenté qu'ailleurs (cf. FAQ 3.3, figure 1, changements dans les journées chaudes). Dans les continents nordiques, les précipitations hivernales sont cependant liées à des températures plus élevées, puisque la capacité de l'atmosphère à retenir l'eau s'accroît dans des conditions de réchauffement. Néanmoins, dans ces régions où le niveau des précipitations a quelque peu augmenté, des températures plus élevées (FAQ 3.1) ont favorisé l'assèchement, rendant les changements dans les précipitations moins facilement décelables à la figure 1.

À mesure que le climat change, divers facteurs peuvent agir directement sur le volume, l'intensité, la fréquence et le type des précipitations. Le réchauffement accélère l'aridification et augmente le risque de sécheresses plus fréquentes et plus rigoureuses, ce qui a été observé dans de nombreuses régions du monde (figure 1). Cependant, selon une loi physique bien connue (relation de Clausius-Clayperton), la capacité de l'atmosphère à retenir l'eau augmente de 7% pour chaque degré Celcius supplémentaire. Les résultats des observations des tendances dans des conditions d'humidité relative n'apportent pas de certitudes, mais suggèrent que, dans l'ensemble, cette capacité n'a pas évolué dans l'espace qui s'étend de la surface terrestre à la troposphère, et que, de ce fait, l'accroissement en vapeur d'eau est dû à la hausse des températures. En se basant sur des changements de température à la surface des océans, on peut dire qu'au cours du XX^e siècle la vapeur d'eau atmosphérique a augmenté de 5% au-dessus des mers. Puisque les précipitations proviennent principalement des systèmes météorologiques qui sont alimentés par la vapeur d'eau retenue dans l'atmosphère, elles ont crû en intensité, augmentant le risque de fortes pluies et de chutes de neige. Les théories de base, les modèles de simulation climatique et les expériences empiriques confirment que sous des climats plus chauds, les phénomènes pluvieux sont plus violents du fait d'une concentration supérieure en vapeur d'eau, même si le volume annuel total des précipitations est légèrement plus faible ; en outre des précipitations encore plus violentes sont à prévoir avec l'augmentation du volume total des précipitations. Un climat plus chaud entraîne donc à la fois un risque de sécheresse – là où il ne pleut pas – et un risque d'inondations – là où il pleut, mais à des moments et/ou des endroits différents. Par exemple, en été 2002, l'Europe a subi des inondations généralisées, mais l'année suivante, 2003, a été celle des records de vagues de chaleur et de sécheresse. La répartition géographique et temporelle des inondations et des sécheresses est largement déterminée par les événements cycliques d'El Niño, particulièrement dans les régions tropicales et dans les pays de latitude moyenne en bordure du Pacifique.

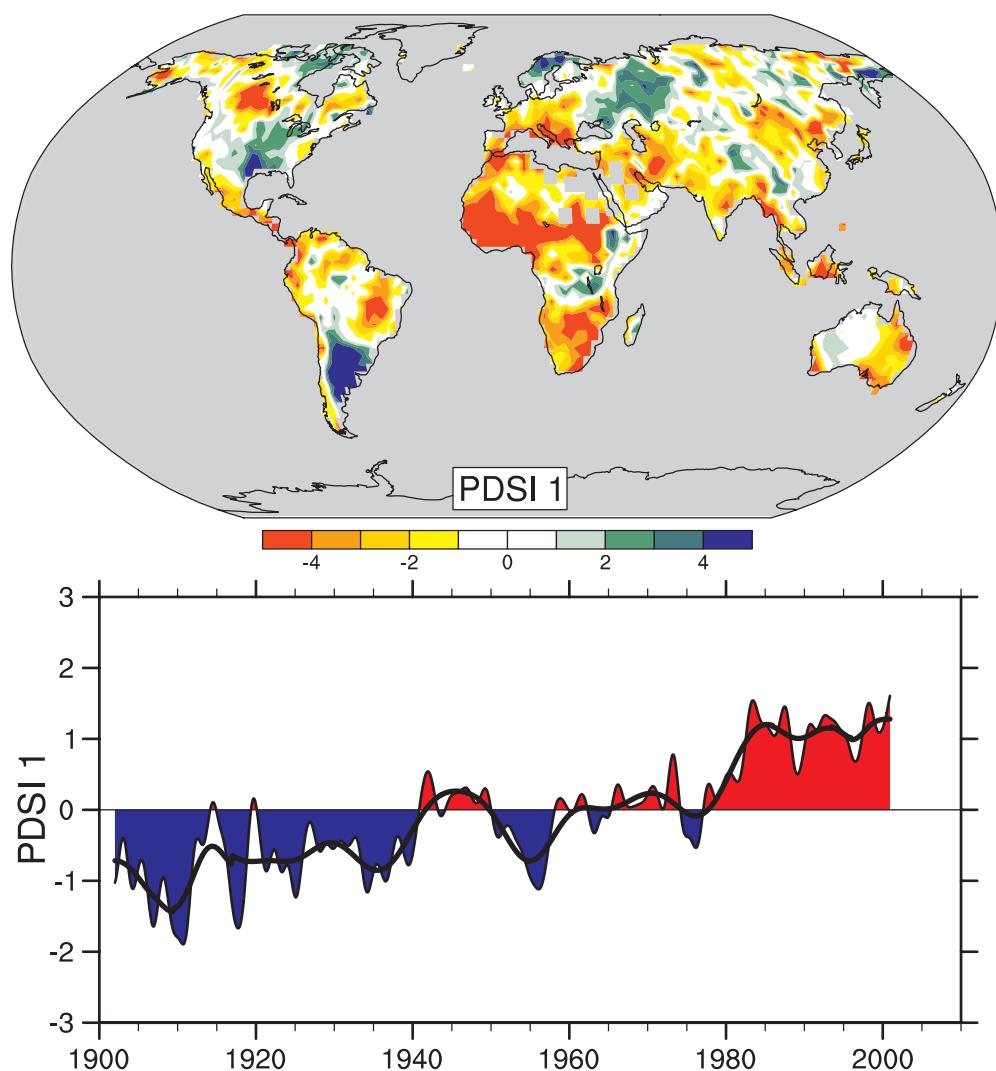
Dans les régions où la pollution par aérosols empêche le soleil de recevoir directement les rayons du soleil, la diminution de l'évaporation réduit l'apport d'humidité dans l'atmosphère. De ce fait, même si les précipitations peuvent être plus fortes en raison de concentration en vapeur d'eau plus importante, leur durée et leur intensité peuvent être écourtées, puisque l'atmosphère mettra plus

longtemps à se recharger en vapeur d'eau.

Des changements locaux et régionaux dans le caractère des précipitations dépendent aussi en grande partie de la structure de la circulation atmosphérique déterminée par El Niño, l'Oscillation nord-atlantique (ONA : mesure de la force des vents d'ouest dans l'Atlantique nord en saison hivernale) et d'autres canevas de variabilité. Certains changements observés dans la circulation sont liés au changement climatique. Un écart dans la trajectoire d'un ouragan rendra certaines régions plus humides, et en assèchera d'autres, souvent voisines, rendant les changements d'autant plus complexes. Par exemple, dans le secteur européen, une ONA plus positive dans les années 1990 a entraîné des conditions plus humides dans

le nord de l'Europe et des conditions plus sèches dans le pourtour méditerranéen et en Afrique du Nord (figure 1). La sécheresse prolongée au Sahel (voir figure 1), intense de la fin des années 1960 à la fin des années 1980, persiste encore, bien qu'elle ait perdu en intensité ; elle résulte de changements dans la circulation atmosphérique qui ont entraîné des changements dans la structure thermique de la surface des mers tropicales de l'océan Pacifique, de l'océan Indien et de l'océan Atlantique. La sécheresse s'est étendue à presque toute l'Afrique et devient moins rare dans les régions tropicales et subtropicales.

Les températures s'élevant, il est probable que les précipitations arrivent plutôt sous forme de pluie que de neige, surtout en au-



FAQ 3.2, Figure 1. Représentation géospatiale la plus importante (en haut) de l'Indice de sévérité des sécheresses, développé par Palmer (PDSI), sur une base mensuelle, pour les années 1900-2002. Le PDSI est le principal indice des sécheresses ; il mesure le déficit cumulé d'humidité à la surface des terres (par rapport aux conditions moyennes locales) en incorporant dans un système comptable hydrologique les précipitations antérieures et les estimations de l'humidité entraînée dans l'atmosphère (sur la base des températures atmosphériques). Le cadre inférieur illustre la façon dont le signe et la puissance de ce modèle ont changé depuis 1900. Les zones en rouge et en orange sont plus sèches (humides) que la moyenne ; les zones en bleu et en vert sont plus humides (sèches) que la moyenne, lorsque les valeurs du graphique inférieur sont positives (négatives). La courbe noire indique les variations décennales. La série temporelle correspond approximativement à une tendance schématisée qui, avec ses variations, représente 67% de la tendance linéaire du PDSI pour les régions continentales du globe entre 1900 et 2002. Le schéma met en évidence l'extension massive de la sécheresse en Afrique, en particulier au Sahel. À noter également les zones plus humides, en particulier dans les régions orientales de l'Amérique du Nord et du Sud, ainsi que dans le nord de l'Eurasie. Adapté de Dai et al. (2004b).

tombe et au printemps, au début et à la fin de la saison des neiges, ainsi que dans des régions où les températures avoisinent le 0°C. De nombreuses régions, notamment les terres de l'hémisphère Nord situées à des latitudes moyennes et élevées, sont déjà touchées par de tels changements qui amènent plus de pluie mais moins de neige, tarissant ainsi les ressources en eau pendant l'été, lorsqu'elles sont le plus nécessaires. Néanmoins, le caractère souvent ponctuel et intermittent des précipitations signifie que les canevas des changements

observés sont complexes. Des relevés à long terme soulignent que les modèles des précipitations varient d'une année à l'autre, et que même une période de sécheresse sur plusieurs années est habituellement interrompue par une année de fortes pluies ; lorsque se manifeste l'influence d'El Niño, par exemple. À titre d'exemple, citons l'hiver humide de 2004-2005 dans le sud-ouest des États-Unis qui a suivi 6 années de sécheresse et d'enneigement inférieur à la normale.

QUESTION FRÉQUENTE 3.3

Y a-t-il eu un changement en ce qui concerne les événements météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations et les ouragans ?

Depuis 1950, la fréquence des vagues de chaleur a augmenté, de même que le nombre de nuits chaudes. Le nombre de régions affectées par des sécheresses a également progressé du fait que les précipitations ont légèrement diminué sur les sols, alors que l'évaporation due au réchauffement a augmenté. En règle générale, le nombre de fortes précipitations quotidiennes entraînant des inondations a augmenté, mais pas partout. La fréquence des tempêtes et ouragans tropicaux varie considérablement d'une année à l'autre, mais depuis les années 1970 on constate que ces événements ont fortement augmenté en intensité et en durée. Dans les zones non tropicales, les variations dans les trajectoires et dans l'intensité des tempêtes sont le reflet des variations dans les caractéristiques majeures de la circulation atmosphérique telle que l'Oscillation nord-atlantique.

Dans plusieurs régions du monde, on a pu constater des signes de changements dans divers phénomènes climatiques extrêmes. Les valeurs généralement données à ces extrêmes excèdent 1, 5 et 10% du temps (à une extrémité) ou 90, 95 et 99% du temps (à l'autre extrémité). Les nuits douces ou les journées chaudes (voir ci-dessous) sont celles où la température dépasse le 90^e centile, tandis que les nuits ou journées froides sont celles où la température descend au-dessous du 10^e centile. Les fortes précipitations sont celles dont les volumes journaliers dépassent le 95^e centile (le 99^e pour les « très fortes précipitations »).

Les échantillonnages effectués sur des terres émergées depuis les 50 dernières années ont indiqué une forte diminution annuelle de nuits froides et une forte augmentation annuelle de nuits douces (figure 1). La diminution du nombre de jours froids et l'augmentation du nombre de jours chauds, bien que courante, est généralement moins marquée. Non seulement les écarts entre les températures minimales et maximales se sont creusés avec le réchauffement général, mais la température des froids extrême s'est élevée plus rapidement que celle des chaleurs extrêmes au cours des 50 dernières années (figure 1). Des pics de chaleur impliquent des vagues de chaleur plus fréquentes. D'autres relevés signalent une tendance à des gelées plus rares, due à un réchauffement moyen dans la plupart des régions des latitudes moyennes.

Un indice patent du changement dans les contrastes extrêmes est l'augmentation évidente des fortes précipitations sous les moyennes latitudes au cours des 50 dernières années, même dans les endroits où la pluviosité moyenne n'a augmenté pas (voir aussi FAQ 3.2). Pour ce qui concerne les très fortes précipitations, on enregistre également des tendances à la hausse, mais les résultats ne sont encore disponibles que pour de rares régions.

La sécheresse est plus facilement mesurable en raison de sa durée. Bien qu'il existe de nombreux indicateurs et méthodes de mesure de la sécheresse, de nombreuses études utilisent le niveau total des précipitations mensuelles et des températures moyennes

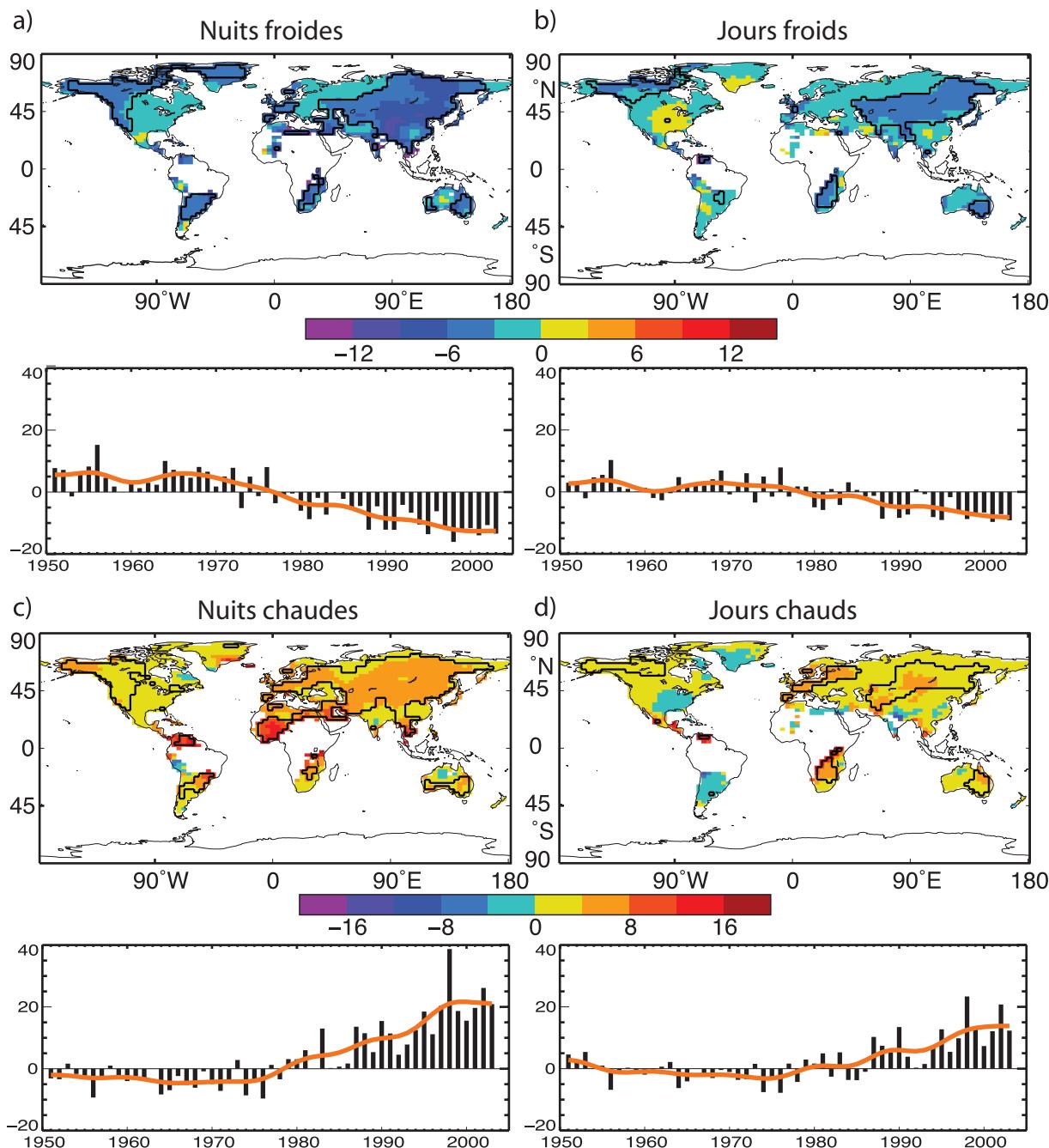
combinés en une seule mesure, appelée le PDSI (Palmer Drought Severity Index – Indice de la sévérité des sécheresses, développé par Palmer). Le PDSI calculé depuis le milieu du XX^e siècle montre une forte tendance à la sécheresse de nombreuses terres de l'hémisphère Nord depuis le milieu des années 1950, accompagnée d'une sécheresse s'étendant au sud de l'Eurasie, au nord de l'Afrique, au Canada et en Alaska. (FAQ 3.2, figure 1), de même qu'une tendance inverse dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud. Dans l'hémisphère Sud, les terres étaient humides dans les années 1970 et relativement sèches dans les années 1960 et 1990; il existait une tendance à la sécheresse entre 1974 et 1998. Des relevés sur de plus longues durées en Europe au cours du XX^e siècle montrent peu de tendances significatives. La diminution des précipitations continentales depuis les années 1950 est probablement la cause principale de la tendance à la sécheresse, bien qu'un fort réchauffement de surface durant les deux ou trois dernières décennies en ait aussi été un facteur important. Une étude indique que mondialement, la surface des zones émergées très sèches (définies comme des zones avec un PDSI inférieur à -3,0) a plus que doublé depuis 1970, alors que parallèlement, les précipitations continentales avaient, dans un premier temps, diminué à cause de l'effet El Niño/Oscillation australe, pour augmenter ensuite, principalement à cause du réchauffement à la surface des terres.

Les changements dans la fréquence et l'intensité des tempêtes tropicales et des ouragans sont masqués par une importante variabilité naturelle. Le phénomène El-Niño-Oscillation australe touche de près la localisation et l'activité des tempêtes tropicales dans le monde. Dans l'ensemble, les estimations indiquent que depuis le milieu de 1970, la capacité dévastatrice des ouragans, leur durée et leur intensité, ont fortement augmenté et que leur activité dépend de la température à surface de l'eau des mers tropicales. Cette interdépendance a été confirmée par les résultats de recherches, montrant une forte augmentation proportionnelle du nombre d'ouragans violents dans le monde depuis 1970, bien que le nombre de cyclones et de journées cycloniques ait légèrement diminué dans la plupart des bassins. En particulier, le nombre d'ouragans de force 4 et 5 a augmenté de 75% depuis 1970. La plus forte augmentation est ressentie dans le Pacifique nord, dans l'océan Indien et dans le Pacifique sud. Cependant, sur les 9 des 11 dernières années, le nombre d'ouragans dans l'Atlantique nord a aussi progressé par rapport à la moyenne, le record ayant été atteint en 2005.

En se basant sur diverses mesures effectuées tant en surface que dans les hautes couches de la troposphère, on peut affirmer que, selon toute vraisemblance, durant la deuxième moitié du XX^e siècle la trajectoire des blizzards s'est décalée en direction des pôles tout en se renforçant dans l'hémisphère Nord. Ces changements font partie des variations dues à l'Oscillation nord-atlantique.

Les observations effectuées entre 1979 et le milieu des années 1990 révèlent que la circulation atmosphérique circumpolaire de secteur ouest serait plus forte de décembre à février dans la troposphère et la basse stratosphère, accompagnée de déplacements des courants-jets vers les pôles et d'une activité cyclonique renforcée. Les observations prouvent que les changements dans des événements météorologiques violents mais de faible amplitude

(tels que les tornades, la grêle et les orages) sont souvent localisés et trop géographiquement dispersés pour qu'on puisse en tirer des conclusions générales ; la sensibilisation de la société à ces événements et les efforts entrepris pour collecter des informations les concernant se trouvent à la source des augmentations observées dans de nombreuses régions.



FAQ 3.3, Figure 1. Tendances observées entre 1951 et 2003 (en jours par décennie) de la fréquence des températures extrêmes, sur la base des valeurs pour 1961 - 1990, et de cartes pour le 10^e centile : (a) nuits froides et (b) jours froids ; pour le 90^e centile : (c) nuits chaudes et (d) jours chauds. Les tendances n'ont été calculées que pour les grilles comprenant des données portant sur 40 ans au moins de cette période et tout au moins jusqu'en 1999. Les lignes noires entourent les régions où les tendances sont significatives au niveau des 5%. Sous chaque carte sont indiquées les séries temporelles annuelles des anomalies réparties dans le temps (de 1961 à 1990). La ligne rouge indique les variations par décennie. Les tendances sont significatives au niveau des 5% pour tous les indices planétaires indiqués. Adapté de Alexander et al. (2006).

Question fréquente 4.1

Les quantités de neige et de glace sont-elles en train de diminuer ?

Oui. Des observations montrent une diminution de la neige et de la glace sur la planète depuis de nombreuses années, en particulier depuis 1980, s'accélérant au cours des dix dernières années, malgré une augmentation en certains endroits et peu de changements en d'autres (figure 1). La plupart des glaciers montagneux reculent. Le manteau neigeux se rétracte plus tôt au printemps. L'inlandsis de l'Arctique rétrécit en toutes saisons, et de façon encore plus spectaculaire en été. On remarque des diminutions du pergélisol, des gélisol, de la glace des rivières et des lacs. De vastes portions des nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ouest s'amincent, tout comme les glaciers de la péninsule Antarctique, et contribuent à l'élévation du niveau de la mer. On estime que pour la période 1993-2003 la fonte des glaciers, de la calotte glaciaire et des inlandsis a contribué pour $1,2 \pm 0,4 \text{ mm an}^{-1}$ à l'élévation du niveau de la mer.

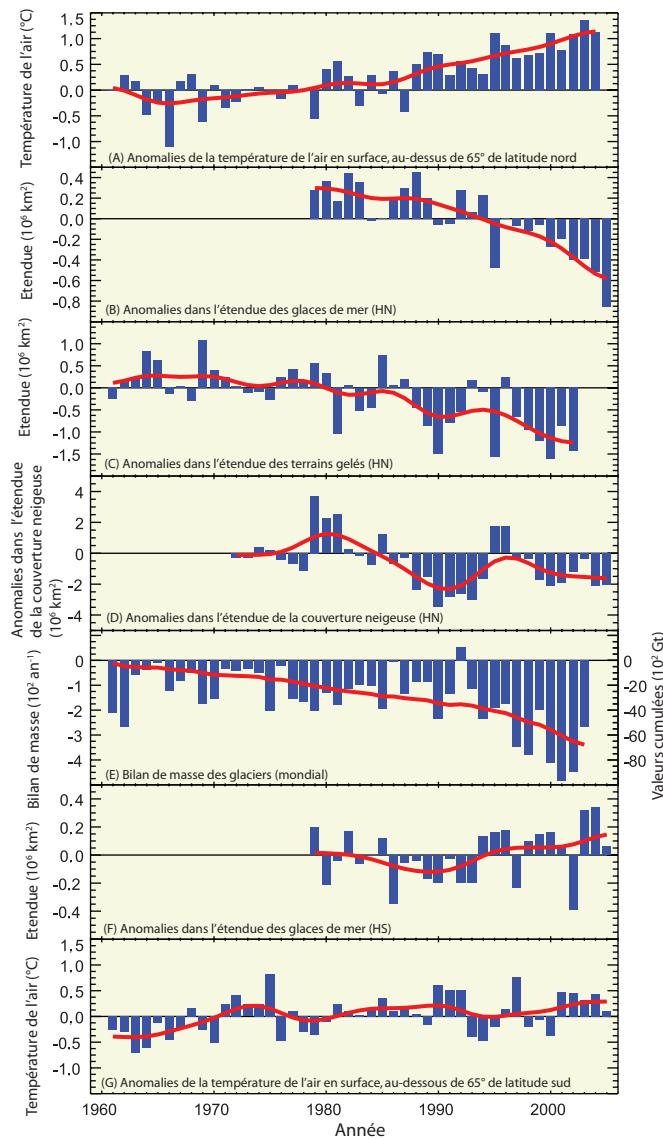
Les mesures satellitaires en continu englobent une grande partie de la couverture neigeuse saisonnière mondiale et révèlent que depuis 1966 elle a décrue d'environ 2% par décennie dans l'hémisphère Nord, bien que peu de changements aient été décelés en automne ou au début de l'hiver. Dans beaucoup d'endroits on dénote un raccourcissement du printemps bien que le volume des précipitations ait augmenté.

Les données satellitaires ne permettent pas encore d'obtenir des mesures aussi fiables sur l'état de la glace des lacs et des rivières, ou encore sur celui des gélisol et pergélisol. Néanmoins, de nombreux rapports locaux et régionaux semblent indiquer le réchauffement du pergélisol, l'augmentation de la profondeur de la couche de fonte du pergélisol en période estivale, l'augmentation de la profondeur de la couche de fonte hivernale du gélisol, le rétrécissement de l'étendue du pergélisol, ainsi que la diminution des glaces saisonnières des rivières et des lacs.

Depuis 1978, les satellites fournissent en permanence des données sur l'étendue des glaces de mer des deux zones polaires. En Arctique, l'étendue moyenne annuelle des glaces de mer a diminué de $2,7 \pm 0,6\%$ par décennie, tandis que l'étendue des glaces de mer estivales a diminué de $7,4 \pm 2,4\%$ par décennie. L'étendue des glaces de mer dans l'Antarctique ne montre pas de tendances significatives. Les données portant sur l'épaisseur des glaces de mer sont essentiellement fournies par les sous-marins, mais ne concernent que la partie centrale de l'Arctique, dans laquelle on constate un amincissement de l'ordre de 40% entre la période 1958-1977 et les années 1990. Cependant, appliquer ce chiffre à toute la région arctique serait une surestimation.

La plupart des glaciers montagneux et des calottes glaciaires ont rétréci ; leur recul a probablement commencé vers 1850. Bien que de nombreux glaciers de l'hémisphère Nord soient restés relativement stables pendant quelques années, leur retrait s'est accéléré depuis 1970. Entre 1991 et 1994, la fonte des glaciers et des calottes glaciaires a contribué à une élévation du niveau de la mer de l'ordre de $0,77 \pm 0,22 \text{ mm an}^{-1}$.

Il est très probable que les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique rétrécissent ; entre 1993 et 2003, leur fonte a contribué à une élévation du niveau de la mer de l'ordre de $0,2 \pm 0,1 \text{ mm an}^{-1}$ pour le Groenland, et de $0,2 \pm 0,35 \text{ mm an}^{-1}$ pour l'Antarctique. L'accélération de ce rétrécissement a été manifeste en 2005.



FAQ 4.1, Figure 1. Évolution des anomalies dans le temps (écart par rapport aux moyennes à long terme) pour la température de l'air polaire en surface (A, G), l'étendue des nappes glaciaires arctiques et antarctiques (B, F), l'étendue du gélisol dans l'hémisphère Nord (HN) (C), l'étendue de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord (D) et l'équilibre de la masse glaciaire mondiale (E). Le trait continu rouge du graphique E indique les valeurs cumulées de l'équilibre de masse glaciaire mondiale ; dans les autres graphiques, il indique les variations décennales (voir Appendice 3.A).

L'épaississement en altitude des régions froides du Groenland et de l'Antarctique est dû, peut-être, à un taux d'enneigement accru, a été plus que compensé par le rétrécissement des régions côtières du Groenland et de l'Antarctique Ouest résultant du rythme accéléré de la fonte des glaces et du dégel des surfaces du Groenland.

L'interaction de la glace et du climat environnant est un processus complexe, de sorte que les causes des changements spécifiques peuvent ne pas être toujours claires. Mais la glace fond inexorablement lorsque la température locale dépasse le seuil de congélation. Dans de nombreux cas, la couverture neigeuse et les glaciers montagneux se rétractent malgré un taux d'enneigement accru, en raison d'une hausse de la température de l'air. De même, bien que les gélisol, ainsi que les glaces fluviales et lacustres soient affectés

par l'altération du manteau neigeux, cela ne suffit pas à expliquer les changements observés qui suggèrent plutôt une hausse locale considérable de la température de l'air. La diminution observée des glaces de mer dans l'Arctique peut être aisément simulée au moyen de modèles basés sur les archives historiques relatives aux variations dans la circulation et les températures. Les chutes de neiges accrues observées sur les inlandsis de certaines régions centrales froides, la fonte des glaces en surface dans des régions côtières et la fonte qui se produit sous les inlandsis le long de nombreuses côtes vont de pair avec le réchauffement. L'extension géographique de l'évolution des conditions nivales et glaciaires suggèrent qu'un réchauffement général est à l'origine de la déglaciation globale sur Terre.

QUESTION FRÉQUENTE 5.1

Le niveau de la mer monte-t-il ?

Oui. Les preuves existantes indiquent avec fiabilité que le niveau global de la mer s'est progressivement élevé au cours du XX^e siècle et qu'il continue de monter rapidement, après une période de stabilité relative entre l'An 0 et 1900. On prévoit que le niveau de la mer s'élèvera encore plus rapidement au XXI^e siècle. Les deux causes principales de l'élévation du niveau mondial de la mer sont la dilatation thermique des océans (l'eau se dilate avec la chaleur) et la disparition des glaciers continentaux due à une augmentation de la fonte des glaces.

Le niveau de la mer dans le monde a augmenté d'environ 120 mètres au cours des millénaires qui ont suivi la dernière ère glaciaire (il y a de cela environ 21 000 ans), puis il s'est stabilisé il y a 2000 à 3000 ans. Les indicateurs du niveau de la mer semblent montrer que le niveau mondial n'a pas beaucoup changé entre cette époque et la fin du XIX^e siècle. Les mesures instrumentales effectuées pour observer le niveau de la mer actuel montrent que l'élévation du niveau de la mer a débuté au cours du XIX^e siècle. Les estimations concernant le XX^e siècle indiquent que le niveau moyen mondial de la mer s'est élevé au rythme de 1,7 mm/an⁻¹.

Les relevés effectués par les satellites dès le début des années 1990 fournissent des données plus précises et quasi mondiales sur le niveau de la mer. La base des données altimétriques fournies par les satellites depuis une dizaine d'années montre que depuis 1993 le niveau de la mer s'est élevé au rythme de 3 mm/an⁻¹, bien plus rapidement que la moyenne pour le demi-siècle précédent. Les mesures obtenues de marégraphes confirment ces observations et indiquent que de tels rythmes avaient été déjà atteints au cours de décennies précédentes.

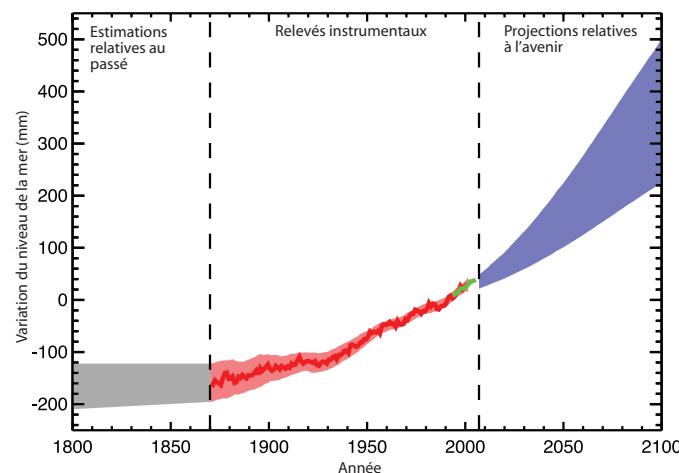
Les données satellitaires et les observations hydrographiques corroborent les modèles climatiques, révélant que l'élévation mondiale du niveau de la mer est à géographie inégale. Dans certaines régions, les rythmes de l'élévation sont beaucoup plus rapides que la moyenne mondiale, tandis que dans d'autres régions, le niveau de la mer baisse. Des observations hydrographiques permettent de conclure qu'il existe d'importantes variations spatiales dans le rythme de l'évolution du niveau de la mer. La variabilité spatiale du rythme de l'élévation du niveau de la mer est due principalement à une évolution hétérogène de la température et de la salinité, et est liée aux changements dans la circulation des courants océaniques.

Les données récentes quasi mondiales sur la température des océans permettent de calculer directement la dilatation thermique. On pense que pour la période 1961-2003 la part moyenne de dilatation thermique dans l'élévation observée du niveau de la mer a représenté près du quart, tandis que celle de la fonte des glaciers continentaux a compté pour à peine la moitié. Ces données n'expliquent donc pas parfaitement l'évolution des rythmes de l'élévation du niveau de la mer, ainsi qu'il est indiqué dans le troisième Rapport d'évaluation du GIEC.

Durant les dernières années (1993-2003), au cours desquelles

le système d'observation s'est nettement amélioré, la dilatation thermique et la fonte des glaces continentales ont contribué, chacune, à près de la moitié à l'élévation observée du niveau de la mer, bien que certaines estimations soient encore sujettes à caution.

La cohérence notée au cours des dernières années entre la rapidité de l'élévation du niveau de la mer et la somme de la dilatation thermique et de la perte de masse des glaces continentales indique un seuil maximum dans l'ampleur des modifications subies par les réserves d'eau continentales, elles-mêmes relativement peu connues. Les résultats des modélisations semblent indiquer que les réserves d'eau continentales n'ont pas tendance à être affectées par le changement climatique, mais que des fluctuations annuelles et décennales considérables existent. Cependant, pour la période 1993-2003, les légères différences observées entre l'élévation du niveau de la mer et la somme des contributions connues peuvent être attribuées à des processus d'origine anthropique non quantifiés (par ex. l'extraction de l'eau des nappes phréatiques, les retenues d'eau dans les réservoirs, le drainage des zones humides et le déboisement).



FAQ 5.1, Figure 1. Série temporelle du niveau moyen mondial de la mer (écart par rapport à la moyenne des années 1980-1999) de par le passé et projections dans l'avenir. Il n'existe pas de mesures mondiales du niveau de la mer pour la période précédant 1870. Les zones ombrées en gris indiquent les incertitudes des estimations à long terme de l'évolution du rythme d'élévation du niveau de la mer (Section 6.4.3). La ligne rouge représente le niveau mondial moyen de la mer d'après les données marégraphiques (Section 5.5.2.1), tandis que les zones ombrées en rouge indiquent les intervalles de variations par rapport à une courbe lissée. La ligne verte représente le niveau de la mer moyen mesuré par altimétrie satellitaire. Les zones ombrées en bleu indiquent la gamme des projections de modèles du scénario A1B du RSSE pour le XXI^e siècle par rapport à la moyenne des années 1980-1999, les calculs ayant été effectués indépendamment des observations. Au-delà de l'année 2100, les projections dépendent de plus en plus du scénario d'émissions (voir au chapitre 10 les projections de l'élévation du niveau de la mer selon d'autres scénarios examinés dans le présent rapport). Au cours de centaines ou de milliers d'années à l'avenir, le niveau de la mer pourrait s'élever de quelques mètres (Section 10.7.4).

La figure 1 présente l'évolution du niveau moyen mondial de la mer de par le passé et en projection pour le XXI^e siècle, selon le scénario RSSE A1B.

On prévoit qu'au XXI^e siècle, le niveau mondial de la mer s'élèvera plus rapidement que durant les années 1961-2003. Dans le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (RSSE), le scénario A1B prévoit, par exemple, que vers le milieu des années 2090 le niveau mondial de la mer s'élèvera de 0,22 à 0,44 mètre au-dessus des niveaux de 1990, au rythme d'environ 4 mm/an⁻¹. Comme de par le passé, l'évolution future du niveau de la mer ne sera pas géographiquement uniforme : elle pourra varier selon les

régions de $\pm 0,15$ mètre autour de la moyenne d'un modèle de projection type. On prévoit que la dilatation thermique contribuera à plus de la moitié de l'élévation moyenne du niveau de la mer, mais que la vitesse de la perte de la masse des glaces continentales ira croissant au fil du siècle. Une incertitude de taille demeure quant à savoir si le déversement de la glace des inlandis continuera d'augmenter suite à un écoulement glaciaire accéléré, comme cela a été observé au cours des dernières années. Le niveau de la mer s'élèverait d'autant, mais sa quantification ne peut pas être entreprise avec confiance en raison du manque de connaissances sur les processus en jeu.

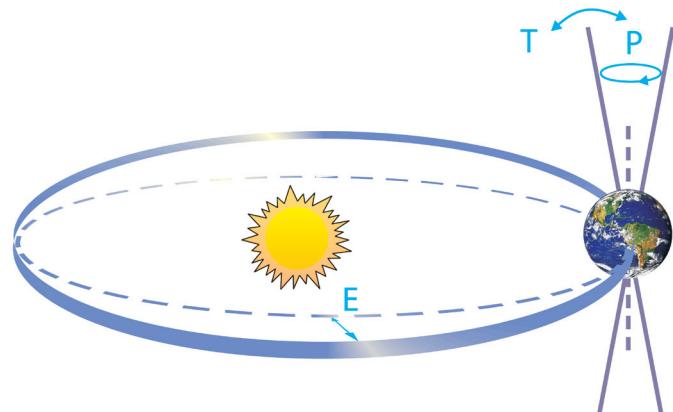
QUESTION FRÉQUENTE 6.1

Qu'est-ce qui a provoqué les périodes glaciaires et autres changements climatiques importants avant l'ère industrielle ?

Le climat de la Terre s'est modifié au cours des temps, bien avant même que l'activité humaine ait pu y jouer un rôle. De progrès considérables ont été réalisés dans la compréhension des causes et des mécanismes de tels changements climatiques. L'altération du bilan énergétique du rayonnement terrestre a été le facteur essentiel du changement climatique dans le passé, mais les causes de cette altération sont multiples. Qu'il s'agisse de périodes glaciaires, du réchauffement au temps des dinosaures ou de fluctuations au cours du dernier millénaire – les causes spécifiques doivent être établies au cas par cas. Dans de nombreux cas, elles peuvent désormais être établies avec une confiance élevée, et de nombreux changements climatiques du passé peuvent être reproduits par des modèles quantitatifs.

Le climat de la planète est déterminé par l'équilibre du rayonnement planétaire (voir FAQ 1.1). Cet équilibre peut varier de trois manières principales, entraînant un changement climatique : (1) modification dans le rayonnement solaire entrant (par ex., modification de l'orbite terrestre ou changements au niveau du Soleil lui-même) ; (2) modification de la fraction du rayonnement solaire qui est réfléchie (cette fraction, appelée albédo, peut être modifiée par des changements de la nébulosité, des minuscules particules appelées aérosols ou de la végétation) ; et (3) altération de l'énergie à grande longueur d'onde renvoyée vers l'espace (par ex., *via* la modification des concentrations des gaz à effet de serre). De plus, le climat local dépend également de la manière dont les vents et les courants océaniques répartissent la chaleur. Tous ces facteurs ont joué un rôle dans le changement climatique du passé.

Il apparaît clairement que les périodes glaciaires qui se sont succédées en cycles réguliers au cours des trois millions d'années passées sont liées aux variations régulières de la rotation de la Terre autour du Soleil, appelées cycles de Milankovitch (figure 1). Ces cycles modifient le volume du rayonnement solaire parvenant à toute latitude en toute saison (mais n'affectent pratiquement pas la moyenne annuelle mondiale) et peuvent être calculés avec une précision astronomique. On ne sait pas encore précisément comment ce phénomène amène le début ou la fin d'une période glaciaire, mais de nombreuses études suggèrent que le taux d'ensoleillement dans les continents nordiques en été est un facteur essentiel : si ce taux s'abaisse en-deçà d'une valeur critique, la neige de l'hiver précédent ne fond pas en été, et l'inlandsis s'épaissit avec l'accumulation croissante de la neige. Les modèles de simulation climatique confirment qu'une période glaciaire peut effectivement commencer de cette manière, tandis que des modèles conceptuels simples ont servi à « rétrograder » le début des glaciations passées en se basant sur des déviations orbitales. Le prochain affaiblissement considérable de l'ensoleillement estival dans les régions boréales, semblable à celui qui a provoqué les périodes glaciaires précédentes, devrait commencer dans 30 000 ans.



FAQ 6.1, Figure 1. Schéma des variations de l'orbite terrestre (cycles de Milankovitch), engendrant les cycles glaciaires. 'T' – modification de l'orientation (de l'inclinaison) de l'axe de la Terre ; 'E' – modifications de l'excentricité de l'orbite (dues aux variations du petit axe de l'ellipse) ; et 'P' – précession, c.à.d. modifications au niveau de l'orientation de l'inclinaison de l'axe par rapport à un point donné de l'orbite. Source : Rahmstorf & Schellnhuber (2006).

Bien que n'étant pas une cause première, le dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) joue également un rôle important dans les périodes glaciaires. Les données fournies par les carottes de glace dans l'Antarctique montrent que la concentration de CO_2 était faible au temps de la glaciation (~190 ppm) et forte durant les périodes interglaciaires de réchauffement (~280 ppm) ; le CO_2 atmosphérique suit l'évolution des températures dans l'Antarctique avec un retard de quelques centaines d'années.

Puisque les changements climatiques au début et à la fin des périodes glaciaires s'étendent sur des millénaires, la plupart d'entre eux sont affectés par une rétroaction positive du CO_2 ; c'est-à-dire qu'un léger refroidissement initial dû aux cycles de Milankovitch s'amplifie, à mesure que décroît la concentration de CO_2 . Des modèles de simulation du climat d'une période glaciaire (voir Section 6.4.1) ne fournissent des résultats réalisistes que si le rôle du CO_2 est pris en compte.

Plus de 20 changements climatiques brusques et violents se sont produits au cours de la dernière période glaciaire, comme en témoignent tout particulièrement des régions de l'Atlantique Nord (voir Section 6.4). Ils diffèrent des cycles glaciaires-interglaciaires en ce qu'ils n'ont probablement pas modifié de façon significative les températures moyennes mondiales : les changements ne se sont pas produits simultanément au Groenland et en Antarctique, et ont évolué à l'opposé dans l'Atlantique Sud et l'Atlantique Nord. Ceci signifie que des variations importantes dans l'équilibre du rayonnement mondial n'auraient pas été nécessaires pour provoquer ces écarts, une redistribution thermique dans le système climatique aurait suffi. Il y a, en effet, de fortes raisons de croire que l'évolution de la circulation océanique et du transport thermique

peuvent expliquer maints aspects de ces évènements brusques ; les données sur les sédiments et les simulations de modèles montrent que certains changements auraient pu être déclenchés par l'instabilité des inlandsis entourant l'Atlantique à ce moment-là, ainsi que par l'apport d'eau douce dans l'océan qui y est associé.

Les archives climatiques font également état de périodes beaucoup plus chaudes : pendant la plupart des 500 millions d'années passées, il n'y avait probablement pas d'inlandsis sur Terre (les géologues sont capables d'en juger d'après les traces laissées par la glace sur les rochers), à l'inverse des temps actuels, où le Groenland et l'Antarctique sont couverts de glace. Les données sur les gaz à effet de serre présents il y a un million d'années, c'est-à-dire au-delà des capacités des carottes glaciaires de l'Antarctique, sont encore incertaines, quoique les analyses géologiques des échantillons recueillis laissent à penser que les périodes chaudes, sans glaciation, coïncideraient avec des taux élevés de CO₂ atmosphérique. Il faut plusieurs millions d'années pour que se modifient les taux de CO₂ ayant pour origine l'activité tectonique qui altère les taux d'échanges de CO₂ entre les océans, l'atmosphère et la Terre. Pour plus d'explications sur les climats anciens, voir l'encadré 6.1.

Les changements climatiques du passé peuvent aussi avoir

pour cause la variabilité de l'énergie solaire sortante. Les mesures effectuées au cours des dernières décennies indiquent que l'énergie solaire varie légèrement (de l'ordre de 0,1%) par cycles de 11 ans. L'observation des taches solaires (dès le XVII^e siècle), ainsi que les renseignements fournis par les isotopes provenant du rayonnement cosmique, apportent la preuve d'une évolution à plus long terme de l'activité solaire. La corrélation des données et des simulations de modèles montrent que la variabilité solaire et l'activité volcanique ont pu être des facteurs de changement climatique au cours du dernier millénaire, avant le début de l'ère industrielle.

Ces exemples démontrent que les divers changements climatiques du passé ont eu des causes différentes. Le fait que des facteurs naturels aient été à l'origine de changements climatiques de par le passé ne signifie toutefois pas que le changement climatique actuel soit d'origine naturelle. Par analogie, le fait que des feux de forêt aient été de tout temps provoqués par des éclairs ne signifie pas que ces feux ne puissent être provoqués par un campeur imprudent. La question FAQ 2.1 traite du rôle de l'influence humaine sur les récents changements climatiques par rapport aux influences d'origine naturelle.

QUESTION FRÉQUENTE 6.2

Le changement climatique actuel est-il inhabituel par rapport aux changements qui se sont produits sur Terre de par le passé ?

Le climat a changé tout au long de l'histoire de la Terre. Si certains aspects du changement climatique actuel ne sont pas inhabituels, d'autres le sont. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère a atteint un niveau record par rapport à la période couvrant plus d'un demi-million d'années passées, et ceci, à un rythme exceptionnellement rapide. Les températures mondiales actuelles sont plus élevées qu'elles ne l'ont jamais été au cours des cinq derniers siècles au moins, voire même du dernier millénaire. Si le réchauffement continue à ce rythme, le changement climatique qui en découlera au XXI^e siècle sera, en termes de géologie, extrêmement inhabituel. Un autre élément inhabituel de ce récent changement climatique en est sa cause: les changements climatiques du passé étaient d'origine naturelle (voir FAQ 6.1), tandis que le réchauffement des 50 dernières années est imputable aux activités humaines.

Lorsqu'on compare les changements climatiques actuels à ceux du passé, d'origine naturelle, trois points sont à remarquer. En premier lieu, il faut savoir exactement quelles sont les variables comparées : s'agit-il de concentrations de gaz à effet de serre ou de températures (ou d'autres paramètres climatiques), et s'agit-il de leurs valeurs absolues ou du rythme de leur évolution ? En second lieu, il ne faut pas confondre les changements à échelle locale et les changements à échelle mondiale. Les changements climatiques locaux sont souvent beaucoup plus importants que les changements climatiques mondiaux, puisque les facteurs locaux (comme les variations de la circulation océanique ou atmosphérique) peuvent déplacer la chaleur ou l'humidité d'un endroit à un autre, ce qui fait intervenir des mécanismes de rétroaction locaux (rétroaction des glaces de mer, par exemple). A l'inverse, une évolution importante des températures moyennes mondiales nécessite quelque forçage global (comme la modification des concentrations de gaz à effet de serre ou de l'activité solaire). En troisième lieu, il est indispensable de distinguer les échelles temporelles. L'évolution du climat sur des millions d'années comparée aux changements climatiques à l'échelle séculaire peut être beaucoup plus importante et avoir des causes différentes (la dérive des continents, par exemple).

La raison principale de l'inquiétude suscitée par le changement climatique actuel est l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère (ainsi que d'autres gaz à effet de serre), ce qui est très inhabituel pour l'ère quaternaire (soit les deux derniers millions d'années). Les carottes de glace de l'Antarctique nous fournissent aujourd'hui des données précises sur les concentrations de CO₂ pendant les 650 000 dernières années. Pendant cette période, les concentrations de CO₂ ont varié entre 180 ppm pendant les glaciations, et 300 ppm pendant les périodes interglaciaires plus chaudes. Au cours du siècle passé, les concentrations ont rapidement dépassé ces valeurs, et atteignent de nos jours 379 ppm (voir le chapitre 2). À titre de comparaison, l'accroissement de la concentration du CO₂ de quelques 80 ppm à la fin des périodes glaciaires pré-

cédentes, s'est étalé sur plus de 5 000 ans. Des valeurs plus élevées que les valeurs actuelles n'ont été atteintes que des millions d'années auparavant (voir FAQ 6.1).

La température est une variable qu'il est plus difficile de reconstituer que le CO₂ (gaz globalement hétérogène), car elle n'a pas la même valeur à travers le monde, de sorte qu'un relevé isolé (une carotte de glace, par ex.) n'aura qu'une valeur limitée. Les écarts locaux de température, même ceux qui ne portent que sur quelques décennies, peuvent atteindre plusieurs degrés Celsius, ce qui dépasse le seuil du réchauffement mondial du siècle passé, qui avoisinait les 0,7°C.

L'analyse à grande échelle (mondiale ou hémisphérique) des moyennes présente encore plus d'importance pour l'évolution mondiale, puisque la plupart des variations locales s'égalisent et la variabilité est plus faible. Les relevés effectués par des instruments de mesure fiables ne remontent qu'à quelque 150 années. Plus loin dans le temps, les compilations de données indirectes récoltées à partir d'anneaux de croissance des arbres, de carottes de glace etc., peuvent remonter aussi loin que mille ans, voire plus, avec une fiabilité décroissante pour les périodes plus reculées (voir section 6.5). Bien qu'il y ait des différences entre ces reconstitutions et que subsistent des plages d'incertitudes, toutes les reconstitutions publiées à ce jour font état de températures chaudes à l'époque médiévale, rafraîchies aux XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles, pour remonter rapidement par la suite. Le niveau de chaleur à l'époque médiévale n'est pas connu avec certitude, mais il aurait pu être atteint de nouveau vers le milieu du XX^e siècle, pour être probablement dépassé depuis lors. Ces conclusions sont également confirmées par des modélisations climatiques. Les écarts de température datant de plus de 2000 ans n'ont pas fait l'objet de compilations systématiques moyennées à grande échelle, aussi ne prouvent-ils pas qu'à l'époque de l'Holocène (il y a 11 600 ans, voir section 6.4), la température pouvait dépasser les moyennes annuelles mondiales actuelles. De fortes présomptions permettent d'affirmer qu'avant il y a 3 millions d'années, le climat était plus doux, la couverture glaciaire bien moins étendue et le niveau de la mer plus élevé. De ce fait, la chaleur actuelle semble inhabituelle dans le contexte du dernier millénaire, mais pas dans un contexte temporel plus vaste, où il faudrait tenir compte des changements de l'activité tectonique (pouvant entraîner une lente évolution naturelle des concentrations de gaz à effet de serre) (voir encadré 6.1).

La vitesse du réchauffement actuel est un autre point d'interrogation. Les données indirectes incluent-elles les changements climatiques mondiaux rapides ? Les variations de température les plus marquantes du dernier million d'années concernent les cycles glaciaires, durant lesquels la température moyenne mondiale a augmenté de 4°C à 7°C entre les périodes glaciaires et interglaciaires, plus douces (les changements locaux étaient plus beaucoup plus importants, par ex., près des inlandsis). Cependant, les données

indiquent que le réchauffement mondial à la fin de toute ère glaciaire était un processus progressif, s'étalant sur près de 5 000 ans (voir section 6.3). Il est donc évident que par rapport aux évolutions du passé, le changement climatique actuel évolue à un rythme bien plus rapide et très inhabituel. Les brusques sautes climatiques des périodes glaciaires, qui donnent lieu à maintes discussions (voir section 6.3), ne constituent pas des contre-exemples puisqu'elles ont probablement été causées par des changements dans la circulation thermique océanique, ce qui ne saurait affecter la température moyenne mondiale.

Si l'on remonte encore plus loin dans le temps, au-delà des données fournies par les carottes de glace, la résolution temporelle des

noyaux sédimentaires et d'autres archives ne met pas en évidence de changements aussi rapides que le réchauffement actuel. De ce fait, bien que d'importants changements climatiques se soient produits dans le passé, rien ne prouve qu'ils aient été plus rapides que le réchauffement actuel. Si les projections qui indiquent un réchauffement d'environ 5°C pour le siècle actuel se réalisaient (limite supérieure de la fourchette), c'est que la Terre aurait subi sensiblement le même réchauffement qu'à la fin de la dernière période glaciaire ; par comparaison avec les diverses hausses de température mondiale depuis 50 millions d'années, un tel rythme attribué aux éventuels changements climatiques futurs serait probablement sans précédent.

QUESTION FRÉQUENTE 7.1

Est-ce que les activités humaines sont à l'origine de l'augmentation du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère ?

Oui. L'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique et d'autres gaz à effet de serre pendant l'ère industrielle est due aux activités humaines. En réalité, l'augmentation observée des concentrations de CO_2 atmosphérique ne révèle pas la totalité de l'impact des émissions d'origine anthropique en ce qu'elle ne prend en compte que 55% du CO_2 dégagé par l'activité humaine depuis 1959 : le reste a été absorbé par les végétaux terrestres et les océans. Dans tous les cas, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et leur augmentation dépendent de l'équilibre entre les sources (émissions de gaz provenant des activités humaines et des systèmes naturels) et les puits (absorption des gaz de l'atmosphère par transformation en un autre élément chimique). Plus de 75% des émissions de CO_2 d'origine humaine sont dus à la combustion de combustibles fossiles (plus une faible contribution des cimenteries). Les changements d'affectation des sols (principalement, le déboisement) sont responsables du reste. Pour ce qui est du méthane, autre gaz à effet de serre important, les émissions provenant d'activités humaines ont dépassé au cours de 25 dernières années les quantités émises par des sources naturelles. Les émissions anthropiques d'oxyde nitreux sont égales aux émissions naturelles vers l'atmosphère. La plupart des gaz halogènes ayant une longue durée de vie (comme les chlorofluorocarbures) sont d'origine anthropique et n'étaient pas présents dans l'atmosphère avant l'ère industrielle. L'ozone troposphérique a crû, en moyenne, de 38% depuis l'époque préindustrielle ; cette augmentation résulte des réactions atmosphériques des polluants de courte durée de vie provenant des activités humaines. La concentration de CO_2 représente actuellement 379 parts par million (ppm), celle du méthane dépasse 1 774 parts par milliard (ppb) – les deux valeurs dépassant de beaucoup celles des 650 000 dernières années (durant lesquelles la concentration de CO_2 s'était maintenue entre 180 et 300 ppm, et celle du méthane entre 320 et 790 ppb). Cette récente accélération de l'évolution porte un caractère dramatique et sans précédent : les augmentations de CO_2 n'avaient jamais dépassé 30 ppm depuis un millier d'années, or on constate aujourd'hui qu'elles ont augmenté de 30 ppm au cours des 17 dernières années.

Le dioxyde de carbone

Depuis l'époque préindustrielle, l'augmentation des concentrations de CO_2 atmosphérique est due principalement aux émissions de CO_2 (figure 1a) provenant de la combustion de combustibles fossiles et, dans une moindre mesure, des cimenteries (total combiné de plus de 75%). Le reste provient des changements apportés à l'affectation des terres, en particulier le déboisement (et la combustion de la biomasse qui s'y rattache), ainsi que des modifications des techniques agricoles. Toutes ces hausses sont d'origine anthropique.

Le cycle naturel du carbone ne peut expliquer que la concentration observée du CO_2 atmosphérique durant les 25 dernières années ait augmenté de 3,2 à 4,1 GtC an $^{-1}$. (Une GtC ou gigatonne de carbone égale 1015 grammes de carbone, soit un milliard de tonnes).

Les mécanismes naturels, tels que la photosynthèse, la respiration, la décomposition et l'échange gazeux à la surface des mers, entraînent des échanges massifs, sources et puits de CO_2 entre la terre et l'atmosphère (estimés à ~ 120 GtC an $^{-1}$), ainsi qu'entre l'océan et l'atmosphère (estimés à ~ 90 GtC an $^{-1}$; voir figure 7.3). Les puits naturels de carbone ont absorbé environ 3,3 GtC net par an de CO_2 pendant les 15 dernières années, compensant partiellement les émissions d'origine humaine. Sans les puits naturels qui ont absorbé pendant ces 15 dernières années près de la moitié du CO_2 d'origine humaine, l'augmentation des concentrations atmosphériques auraient été encore plus dramatique.

On sait que l'accroissement de la concentration atmosphérique en CO_2 est d'origine anthropique, car la façon dont le CO_2 atmosphérique s'est modifié (notamment les proportions des atomes de carbone lourds et légers) est attribuable à du carbone supplémentaire provenant de combustibles fossiles. De plus, les proportions d'oxygène par rapport à l'azote dans l'atmosphère ont diminué à mesure qu'a augmenté le CO_2 ; ceci correspond aux prévisions puisque l'oxygène s'appauvrit lors de la combustion de combustibles fossiles. La végétation et les combustibles fossiles qui se sont formés à partir de matières végétales du passé sont moins riches en isotope carbone-13, une forme lourde de carbone ; celui-ci est plus abondant dans le carbone océanique et dans les émissions volcaniques ou géothermiques. La quantité relative d'isotope carbone-13 dans l'atmosphère est en diminution, ce qui indique que le carbone supplémentaire provient de combustibles et de matières végétales fossiles. Le carbone contient également un isotope radioactif rare, le carbone-14, qui est présent dans le CO_2 atmosphérique, mais absent des combustibles fossiles. Avant les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère, la diminution des quantités relatives de carbone-14 indiquait que le carbone des combustibles fossiles s'ajoutait à l'atmosphère.

Les gaz halogènes

Les activités humaines sont responsables de la plupart des concentrations de gaz halogènes persistants dans l'atmosphère. Avant l'industrialisation, l'atmosphère ne contenait que quelques gaz halogènes d'origine naturelle, comme le bromure de méthyle et le chlorure de méthyle. Au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle, le développement de nouvelles techniques de synthèse chimique a entraîné la prolifération de gaz halogènes d'origine industrielle chimique. Les émissions des principaux gaz halogènes d'origine

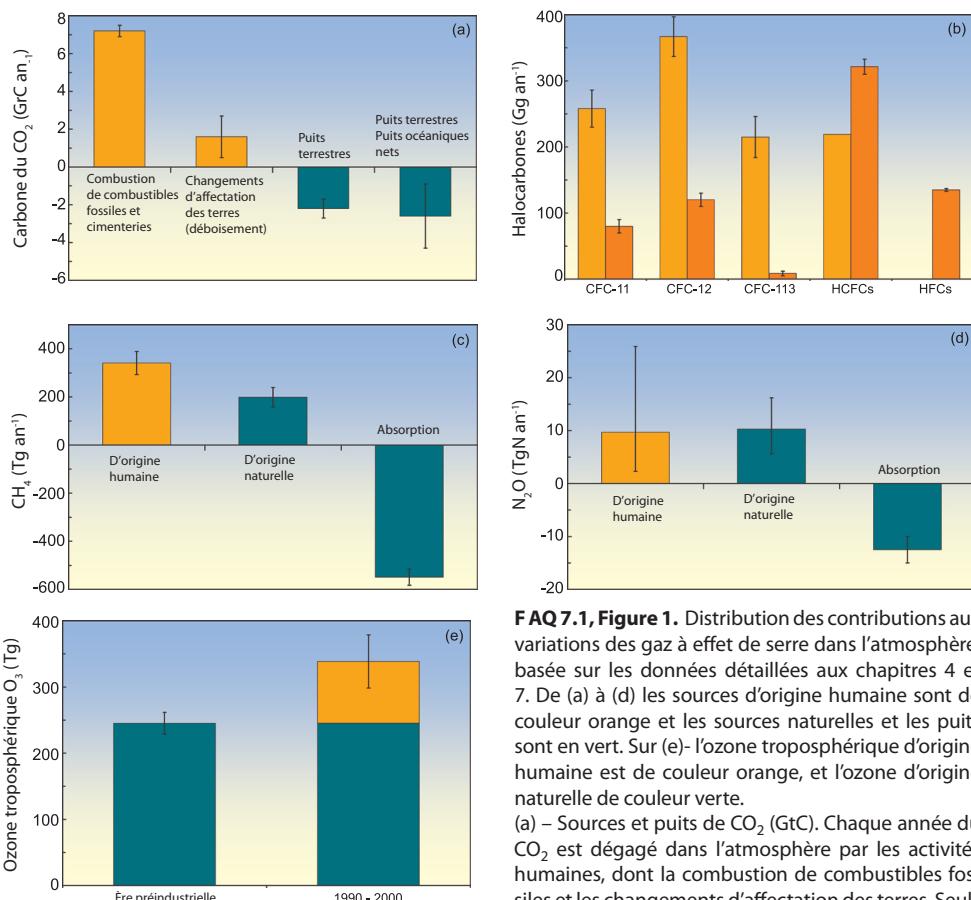
humaine sont indiquées à la figure 1b. Le temps de rémanence dans l'atmosphère des chlorofluorocarbures (CFC) représentés sur le graphique varie entre 45 et 100 ans ; celui des hydrochlorofluorocarbures (HCFC) varie de 1 an à 18 ans, et celui des hydrofluorocarbures (HFC) de 1 an à 270 ans. Les perfluorocarbures (PFC, non représentés) persistent dans l'atmosphère pendant des milliers d'années. Les concentrations de quelques gaz halogénés importants, y compris les CFC, sont en train de se stabiliser ou de décroître à la surface de la Terre suite au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrisse la couche d'ozone, et ses Amendements. Pour l'heure, les concentrations de HCFC, dont les émissions devraient s'arrêter progressivement avant 2030, ainsi que de HFC et PFC régis par le Protocole de Kyoto, continuent d'augmenter.

Le méthane

Les sources du méthane (CH_4) atmosphérique d'origine humaine sont plus importantes que les sources naturelles (figure 1c). Entre 1960 et 1999, le rythme moyen de l'accroissement des concentrations de CH_4 a été au moins six fois plus rapide que celui de n'importe quelle période de 40 ans durant les deux mille ans qui ont précédé 1800 et ceci, malgré des taux de croissance quasiment nuls depuis 1980. Les principales émissions naturelles de CH_4 dans l'atmosphère proviennent des sols humides. S'y ajoutent d'autres sources naturelles, telles les termites, les océans, les végétaux et les hydrates de CH_4 . Les activités humaines dégageant du CH_4 sont, entre autres, la production d'énergie à partir de charbon et de gaz naturel, les décharges de déchets, l'élevage (de bovins et d'ovins, par ex.), la riziculture et la combustion de biomasse. Une fois émis, le CH_4 reste dans l'atmosphère pendant environ 8,4 ans avant d'être absorbé, principalement par oxydation chimique dans la troposphère. Parmi les puits mineurs de CH_4 , on compte son absorption par les sols et pour finir, sa destruction dans la stratosphère.

L'oxyde nitreux

Les sources d'oxyde nitreux (N_2O) atmosphérique d'origine humaine sont sensiblement égales aux sources naturelles (figure 1d). Entre 1960 et 1999, les concentrations de N_2O ont augmenté en moyenne au moins deux fois plus vite qu'au cours de n'importe quelle période de 40 ans durant les deux mille ans précédent 1800. Les principales sources naturelles de N_2O sont les océans, l'oxydation chimique de l'ammoniac dans l'atmosphère, ainsi que les sols. Les sols tropicaux sont une source particulièrement importante de N_2O .



FAQ 7.1, Figure 1. Distribution des contributions aux variations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, basée sur les données détaillées aux chapitres 4 et 7. De (a) à (d) les sources d'origine humaine sont de couleur orange et les sources naturelles et les puits sont en vert. Sur (e)- l'ozone troposphérique d'origine humaine est de couleur orange, et l'ozone d'origine naturelle de couleur verte.

(a) – Sources et puits de CO_2 (GtC). Chaque année du CO_2 est dégagé dans l'atmosphère par les activités humaines, dont la combustion de combustibles fossiles et les changements d'affectation des terres. Seuls

57 à 60% du CO_2 émis par l'homme demeurent dans l'atmosphère. Une partie se dissout dans les océans, une autre est absorbée par les plantes lors de leur croissance. Les fluctuations relatives aux sols se rapportent aux années 1990 ; les fluctuations relatives aux combustibles fossiles et aux cimenteries, ainsi que l'absorption nette par les océans, concernent les années 2000-2005. Toutes les valeurs et les marges d'incertitude proviennent du tableau 7.1.

(b) Émissions mondiales de CFC et d'autres composés halogénés pour 1990 (en orange clair) et 2002 (en orange foncé). Ces produits chimiques sont exclusivement d'origine humaine. Dans le cas présent, les « HCFC » comprennent les HCFC-22, -141b et -142b, tandis que les « HFC » comprennent les HFC-23, -125, -134a et -152a. Un Gg = 109 g (1.000 tonnes). La plupart des données proviennent des rapports mentionnés au chapitre 2.

(c) Sources et puits de CH_4 pour la période 1983-2004. Les sources de CH_4 d'origine humaine sont, notamment, la production d'énergie, les décharges, les ruminants (bovins et ovins), la riziculture et la combustion de la biomasse. Un Tg = 1012 g (1 million de tonnes). Les valeurs et les plages d'incertitude représentent les écarts types et moyens pour le CH_4 des valeurs agrégées correspondantes du tableau 7.6.

(d) Sources et puits de N_2O . Les sources de N_2O d'origine humaine comprennent la transformation des engrains azotés en N_2O et son émission subséquente à partir de terrains agricoles, de la combustion de biomasse, du cheptel et de certaines activités industrielles, telle l'industrie du nylon. Les valeurs des sources et des puits représentent les points médians et extrêmes de la fourchette provenant du tableau 7.7. Les pertes de N_2O sont tirées du chapitre 7.4.

(e) Ozone troposphérique au XIX^e et au début du XX^e siècle ainsi que pour la période 1990-2000. L'augmentation de l'ozone troposphérique est d'origine humaine, elle résulte des réactions chimiques dans l'atmosphère des polluants émis par la combustion de combustibles fossiles ou de biocombustibles. Les valeurs pour l'époque préindustrielle et les plages d'incertitude sont tirées du tableau 4.9 du troisième Rapport d'évaluation (TRE) du GIEC, estimées d'après des reconstitutions d'observations. Le total actuel, ainsi que ses plages d'incertitude, représentent les écarts types et moyens des résultats des modélisations représentés au tableau 7.9 du présent rapport, à l'exception des résultats du TRE.

dans l'atmosphère. Les activités humaines qui émettent du N₂O sont, entre autres, la transformation des engrains azotés en N₂O – qui est ensuite émis par les terrains agricoles –, la combustion de la biomasse, l'élevage, ainsi que d'autres activités industrielles, telle que l'industrie du nylon. Une fois émis, de N₂O reste dans l'atmosphère pendant 114 ans environ avant d'être absorbé, généralement par destruction dans la stratosphère.

L'ozone troposphérique

L'ozone troposphérique est produit par des réactions photo-chimiques dans l'atmosphère mettant en cause des composés chimiques précurseurs, tel le monoxyde de carbone, le CH₄, les composants organiques volatils et les oxydes d'azote. Ces produits chimiques sont émis au cours de processus biologiques naturels, mais aussi par les activités humaines, y compris l'évolution de l'affectation des terres et la combustion de combustibles. Du fait de sa courte durée de vie (allant de quelques jours à quelques se-

maines dans l'atmosphère), la répartition de l'ozone troposphérique est extrêmement variable et est liée à sa teneur plus ou moins forte en composés précurseurs, à la vapeur d'eau et à la lumière du soleil.

Les concentrations d'ozone troposphérique sont nettement supérieures dans l'atmosphère urbaine, dans les zones urbaines sous le vent ainsi que dans les régions où l'on brûle de la biomasse. L'augmentation de la teneur en ozone troposphérique de 38% (20-50%) depuis l'époque préindustrielle (figure 1e) est d'origine humaine.

L'augmentation du forçage radiatif combiné de CO₂, de CH₄ et de N₂O s'est très probablement produite à des rythmes au moins six fois plus rapides entre 1960 et 1999 qu'au cours de n'importe quelle période de 40 ans durant les 2.000 ans qui précédèrent 1800.

Il est très probable que l'augmentation du forçage radiatif combiné des gaz CO₂, CH₄ et N₂O ait été au moins 6 fois plus rapide entre 1960 et 1999 qu'à toute période de 40 ans au cours des deux millénaires avant l'année 1800.

QUESTION FRÉQUENTE 8.1

Quelle est la fiabilité des modèles utilisés pour faire des projections au sujet des changements climatiques futurs ?

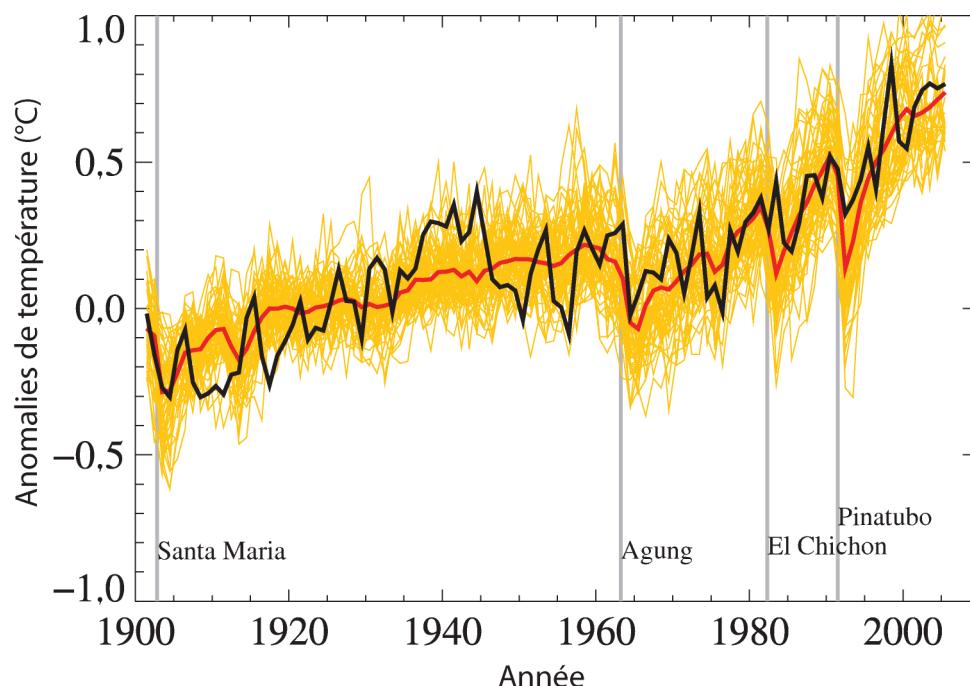
Les modèles fournissant des estimations quantitatives du changement climatique futur sont plutôt fiables, particulièrement à l'échelle continentale et même mondiale. Cette fiabilité découle du fait que les modèles sont basés sur des principes physiques acquis et qu'ils sont capables de reproduire tant les caractéristiques observées du climat actuel que les changements climatiques du passé. La fiabilité des estimations modélisées est plus élevée pour certaines variables climatiques (par ex., les températures) que pour d'autres (par ex., les précipitations). Élaborés depuis des dizaines d'années, les modèles ont invariablement fourni une image sûre et claire du réchauffement climatique résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre.

Les modèles climatiques sont des représentations mathématiques du système climatique, exprimées en codes informatiques et traitées par des ordinateurs puissants. L'une des raisons pour lesquelles on peut faire confiance aux modèles est que les modèles fondamentaux sont basés sur des principes physiques éprouvés, tels que la conservation de la masse, de l'énergie et de la vitesse, ainsi que sur de nombreuses d'observations.

Un autre motif de fiabilité découle de la capacité des modèles à simuler des aspects importants du climat actuel. Les modèles sont périodiquement soumis à des évaluations extensives qui consistent à comparer leurs simulations aux observa-

tions effectuées dans l'atmosphère, les océans, la cryosphère et à la surface de la terre. Au cours de la dernière décennie, des niveaux d'évaluation sans précédent ont été atteints au moyen d'« intercomparaisons » entre plusieurs modèles. Les modèles deviennent de plus en plus aptes à représenter de nombreuses particularités climatiques moyennes, telles que la répartition de la température atmosphérique, des précipitations, des rayonnements et des vents à grande échelle, ainsi que les températures océaniques, les courants et l'étendue des glaces de mer. Les modèles peuvent également simuler les aspects essentiels de nombreux canevas de variabilité climatique observés sur des périodes données. À titre d'exemple, on peut citer l'avancée et le recul des vastes systèmes de mousson, les écarts saisonniers de température, les trajectoires des tempêtes et les zones pluvieuses, ainsi que les oscillations des pressions en surface dans les régions extratropicales des hémisphères (« les régimes annulaires » nord et sud). On a également testé certains modèles climatiques, ou des variantes proches, en les utilisant pour prédire le temps qu'il fera et faire des prévisions météorologiques saisonnières. Ces modèles se sont avérés très performants lors des prévisions, démontrant qu'ils pouvaient dégager à court terme les aspects principaux de la circulation générale, ainsi que les aspects de la variabilité saisonnière et interannuelle. La capacité

FAQ 8.1, Figure 1. Moyenne mondiale des températures en surface au cours du XX^e siècle, résultant d'observations (en noir) et obtenues au moyen de 58 simulations effectuées par 14 modèles climatiques différents basés sur les facteurs d'origine naturelle et humaine qui influencent le climat (en jaune). Les moyennes de ces séries suivent le trait épais rouge. Les anomalies de température sont indiquées par rapport aux moyennes pour la période 1901-1950. Les lignes verticales grises indiquent la durée des éruptions volcaniques majeures. (Tiré du chapitre 9, figure 9.5. Pour d'autres détails, voir la légende correspondante).



des modèles à représenter ces aspects climatiques et d'autres caractéristiques d'importance nous confirme qu'ils représentent bien les processus physiques essentiels pour la simulation de l'évolution future du climat. (À noter que les limitations des modèles climatiques en matière de prévisions météorologiques au-delà de quelques jours ne les empêchent pas de prédire un changement climatique à long terme, car ce sont des prévisions totalement différentes – voir FAQ 1.2).

Un troisième facteur de fiabilité est la capacité des modèles à reproduire les caractéristiques des climats et des changements climatiques passés. On a utilisé des modèles pour simuler d'anciens climats, tels que le climat doux de l'Holocène moyen d'il y a 6 000 ans, ou celui de la dernière grande glaciation remontant à 21 000 ans (voir chapitre 6). Ils peuvent reproduire de nombreux aspects (avec une certaine marge d'incertitude dans la reconstitution des climats anciens), tels que l'ampleur et l'extension du refroidissement océanique pendant la dernière période glaciaire. Les modèles peuvent également simuler de nombreux aspects du changement climatique relevés par les instruments de mesure. À titre d'exemple, la courbe globale de la température au siècle passé (voir figure 1) peut être modélisée avec précision si l'on tient compte à la fois des facteurs humains et naturels qui affectent le climat. Les modèles reproduisent également d'autres changements observés : par exemple, le fait que la température s'élève plus rapidement la nuit que le jour, que le réchauffement s'accélère dans l'Arctique, et que de fortes éruptions volcaniques, comme celle du Mont Pinatubo en 1991, provoquent sur la planète un léger refroidissement de courte durée (suivi d'un réchauffement consécutif) (voir FAQ 8.1, Figure 1). Les projections modélisées des températures mondiales effectuées au cours des vingt dernières années correspondent également aux observations effectuées ultérieurement sur cette période (chapitre 1).

Cependant, les modèles comportent encore des erreurs importantes. Bien que celles-ci se produisent plus souvent à une échelle réduite, des problèmes subsistent à une échelle plus vaste. Par exemple, des insuffisances apparaissent dans la simulation des précipitations tropicales, de l'Oscillation australe- El Niño et de l'Oscillation Madden-Julian (écart observé dans les systèmes venteux et pluviaux tropicaux sur une échelle temporelle allant de 30 à 90 jours). La source principale de ces erreurs réside dans le fait que les modèles ne représentent pas explicitement les processus de faible amplitude, mais néanmoins importants, et que ceux-ci doivent donc être inclus sous une forme approximative car ils agissent en conjonction avec des phénomènes plus importants. Ceci est en partie dû à la puissance limitée des calculs informatiques, mais résulte également de la compréhension scientifique limitée ou de la grossièreté des observations de certains phénomènes physiques. Des incertitudes de taille

sont notamment liées à la représentation des nuages et donc, à leurs réactions au changement climatique. Par conséquent, les modèles continuent de présenter une large fourchette de variations dans l'évolution de la température mondiale en fonction des forçages de gaz à effet de serre spécifiques (voir chapitre 10). Malgré ces incertitudes, tous les modèles prévoient que l'augmentation des gaz à effet de serre entraînera un réchauffement climatique important, et l'ampleur de ce réchauffement correspond aux estimations provenant de sources indépendantes, comme celles qui découlent des changements climatiques observés dans le passé et des reconstitutions des climats d'autan.

Puisque les modèles simulant les changements à l'échelle mondiale sont moins fiables à une échelle réduite, d'autres techniques ont été élaborées pour étudier le changement climatique à l'échelle régionale ou locale, par exemple l'utilisation de modèles climatiques régionaux ou modèles descendants (voir FAQ 11.1). Néanmoins, à mesure que les modèles mondiaux se développent et que leur résolution s'améliore, ceux-ci deviennent de plus en plus utiles pour étudier les aspects de moindre ampleur, tels que l'évolution des événements climatiques extrêmes ; on espère en outre apporter d'autres améliorations aux représentations régionales grâce à une puissance accrue des ordinateurs. Les modèles sont aussi de plus en plus capables de traiter l'ensemble du système climatique de manière exhaustive, et donc de mieux expliquer un plus grand nombre de phénomènes physiques et biophysiques et d'interactions considérées comme potentiellement importantes pour le changement climatique, notamment sur des échelles temporelles plus étendues. Par exemple, depuis peu certains modèles climatiques mondiaux incluent les réactions des plantes, les interactions biologiques et chimiques des océans, ainsi que la dynamique des inlandis.

En résumé, la fiabilité des modèles découle des principes physiques sur lesquels ils sont basés et de leurs capacités à représenter un climat observé et les changements climatiques du passé. Les modèles se sont révélés être des instruments extrêmement importants pour la simulation et la compréhension du climat, et il y a de bonnes raisons de croire qu'ils peuvent fournir des estimations quantitatives fiables des changements climatiques futurs, surtout sur une plus grande échelle. Les modèles sont encore considérablement limités, en particulier pour la représentation des nuages, ce qui rend les prévisions de l'évolution du climat incertaines pour ce qui concerne l'ampleur, la durée et la représentation des événements régionaux ponctuels. Néanmoins, pendant des dizaines d'années les modèles ont invariablement fourni une image claire et nette d'un réchauffement climatique d'importance résultant de l'augmentation des gaz à effet de serre.

QUESTION FRÉQUENTE 9.1

Peut-on expliquer les divers événements extrêmes par le réchauffement dû à l'effet de serre ?

Les extrêmes climatiques vont certainement évoluer à mesure que le climat se réchauffe en raison de l'augmentation des gaz à effet de serre atmosphériques d'origine humaine, produits, par exemple, par l'utilisation de combustibles fossiles. Cependant, il est difficile, voire impossible, de déterminer si tel ou tel événement extrême est provoqué par un facteur spécifique, comme l'augmentation des gaz à effet de serre, et ceci pour deux raisons : 1) les événements extrêmes sont généralement dus à une combinaison de facteurs, et 2) de nombreux événements extrêmes se produisent couramment, même lorsque le climat ne change pas. Néanmoins, l'analyse du réchauffement observé pendant le siècle passé laisse à penser que la fréquence de certains événements extrêmes, comme les vagues de chaleur, a probablement augmenté à cause du réchauffement dû à l'effet de serre, tandis que celle d'autres événements, comme les gelées ou les nuits extrêmement froides, a diminué. À titre d'exemple, une étude a récemment démontré que l'influence humaine a fait augmenter de plus du double le risque d'une canicule estivale en Europe, semblable à celle de 2003.

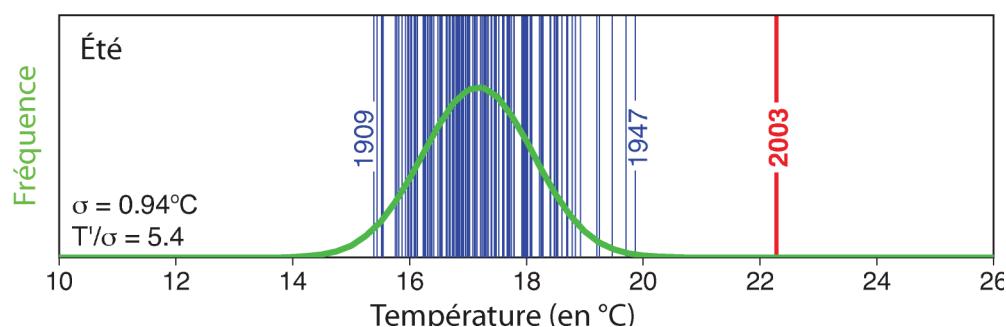
Les personnes touchées par un phénomène météorologique extrême demandent souvent si l'influence de l'homme sur le climat peut être partiellement responsable. Les quelques dernières années ont été témoin de nombreux événements extrêmes, que certains commentateurs ont associés à l'augmentation des gaz à effet de serre. On parle, notamment, de la sécheresse prolongée en Australie, de la canicule en Europe pendant l'été 2003 (voir figure 1), des saisons cycloniques prolongées dans l'Atlantique Nord en 2004 et 2005, ainsi que des pluies torrentielles de Mumbai, en Inde, en juillet 2005. Est-ce qu'une influence humaine, comme l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, pourrait avoir « causé » ces phénomènes ?

Les événements extrêmes sont généralement le fait de plusieurs facteurs combinés. Par exemple, plusieurs facteurs ont contribué à la canicule de l'été 2003 en Europe, dont un système persistant de hautes pressions associé à un ciel très dégagé et à l'aridité au sol, ce qui a laissé passer plus d'énergie solaire pour chauffer la terre, puisque moins d'énergie était consommée pour l'évaporation de l'humidité au sol. De même, la formation d'ouragans nécessite une température élevée à la surface des mers et des conditions spécifiques de circulation atmosphérique. Puisque

tous les facteurs (la température à la surface des mers, par exemple) ne sont pas affectés identiquement par les activités humaines, il est malaisé de discerner la part de l'influence humaine dans tel ou tel événement extrême donné.

Néanmoins, on peut utiliser des modèles climatiques pour déterminer si l'influence de l'homme a modifié l'occurrence probable de certains types d'événements extrêmes. Par exemple, dans le cas de la vague de chaleur de l'été 2003 en Europe, un modèle climatique avait été utilisé, ne prenant en compte que l'évolution historique des facteurs naturels du changement climatique, tels que l'activité volcanique et les modifications de l'énergie solaire. Le modèle avait ensuite été repris en y incluant à la fois les facteurs humains et naturels ; la simulation de l'évolution du climat européen qui en avait résulté était beaucoup plus proche de la situation telle qu'elle s'est réellement produite. Sur la base de ces expériences, on a estimé que les activités humaines du XX^e siècle ont fait augmenté de plus du double le risque de voir se reproduire en Europe un été aussi chaud que celui de 2003, et que sans l'influence de l'homme, ce risque n'aurait été que de un sur quelques centaines d'années. Il faudrait des modélisations plus pointues pour estimer l'évolution des risques pour des phénomènes spécifiques intenses, telles une suite de nuits torrides dans une agglomération comme Paris, par exemple.

La valeur d'une telle approche, basée sur la probabilité – « L'influence humaine modifie-t-elle la probabilité de tel ou tel événement ? » – réside en ce qu'elle permet d'évaluer l'influence de facteurs externes, l'augmentation des gaz à effet de serre par exemple, sur la fréquence de phénomènes spécifiques (comme les vagues de chaleur ou les gelées). Il est néanmoins nécessaire de procéder à des analyses statistiques minutieuses, puisque la probabilité de divers phénomènes extrêmes (telles des gelées à



FAQ 9.1, Figure 1. Les températures estivales moyennes en Suisse pour la période 1864-2003 ont été de l'ordre de 17°C (courbe verte). Pendant la canicule de 2003, les températures moyennes ont dépassé 22°C (trait rouge) (chaque barre verticale représente une année pour les relevés effectués sur 137 ans). La distribution de Gauss est indiquée en vert. Les années 1909, 1947 et 2003 sont mises en évidence car elles représentent des années record. Les valeurs indiquées dans le coin inférieur gauche indiquent l'écart type (σ), ainsi que l'anomalie de 2003, normalisée par l'écart type (T/σ) pour la période 1864-2000. Source : Schär et al. (2004).

la fin du printemps) peut varier en fonction de la variabilité climatique ou de l'évolution des conditions climatiques moyennes. De telles analyses dépendent des estimations de la variabilité climatique basées sur des modèles climatiques, et les modèles climatiques utilisés doivent donc représenter cette variabilité de manière adéquate.

La même approche, basée sur la probabilité, peut être em-

ployée pour étudier les variations dans la fréquence des fortes pluies ou des inondations. Les modèles climatiques prévoient que les activités humaines seront responsables d'une augmentation de nombreux événements extrêmes, dont des pluies torrentielles. On dispose déjà des preuves indiquant que les précipitations extrêmes ont augmenté dans certaines régions, entraînant un nombre accru d'inondations.

QUESTION FRÉQUENTE 9.2

Le réchauffement du XX^e siècle peut-il s'expliquer par la variabilité naturelle ?

Il très improbable que le réchauffement du XX^e siècle puisse s'expliquer par des causes naturelles. Les dernières années du XX^e siècle ont été anormalement chaudes. La reconstitution du paléoclimat indique que la seconde moitié du XX^e siècle a probablement été la période la plus chaude dans l'hémisphère Nord depuis 1 300 ans. Si la réponse à un accroissement de gaz à effet de serre aussi rapide que celui qui s'est produit au siècle passé est scientifiquement cohérente, elle cesse de l'être si l'on considère le réchauffement en termes des facteurs naturels externes seuls, comme la variabilité du rayonnement solaire et l'activité volcanique. Les modèles climatiques sont des outils appropriés pour étudier les divers facteurs agissant sur le climat de la Terre. Lorsque les modèles incluent les effets de l'augmentation de gaz à effet de serre ainsi que les facteurs naturels externes, ils simulent correctement le réchauffement du siècle passé. Les modèles n'arrivent pas à reproduire le réchauffement observé à partir des seuls facteurs naturels. En y incluant les facteurs humains, les modèles simulent en plus une représentation géographique des variations thermiques sur la planète, qui reproduit celles des récentes décennies. Cette représentation géographique, comprenant des aspects tels que le réchauffement accru à des latitudes élevées au nord, diffère des structures les plus importantes de variabilité climatique naturelle, associées à des mécanismes climatiques internes comme El Niño.

Les variations du climat de la Terre dans le temps ont été provoquées par des mécanismes internes naturels, comme El Niño, ainsi que par des modifications des influences externes. Ces influences externes peuvent être soit d'origine naturelle (activité volcanique et variations du rayonnement solaire), soit d'origine humaine (émissions de gaz à effet de serre, aérosols d'origine anthropique, appauvrissement de la couche d'ozone et changements d'affectation des terres). Le rôle des mécanismes naturels internes peut être évalué par l'étude des variations climatiques observées et au moyen de modèles climatiques, sans modification des facteurs externes qui affectent le climat. L'impact des facteurs externes peut être évalué grâce à des modèles dans lesquels ces facteurs auraient été modifiés, et grâce à la compréhension physique des mécanismes impliqués. Les effets combinés de la variabilité naturelle interne et des facteurs naturels externes peuvent également être évalués à partir des données climatiques recueillies dans les anneaux de croissance des arbres, les carottes de glace et autres types de « thermomètres » naturels, antérieurs à l'ère industrielle.

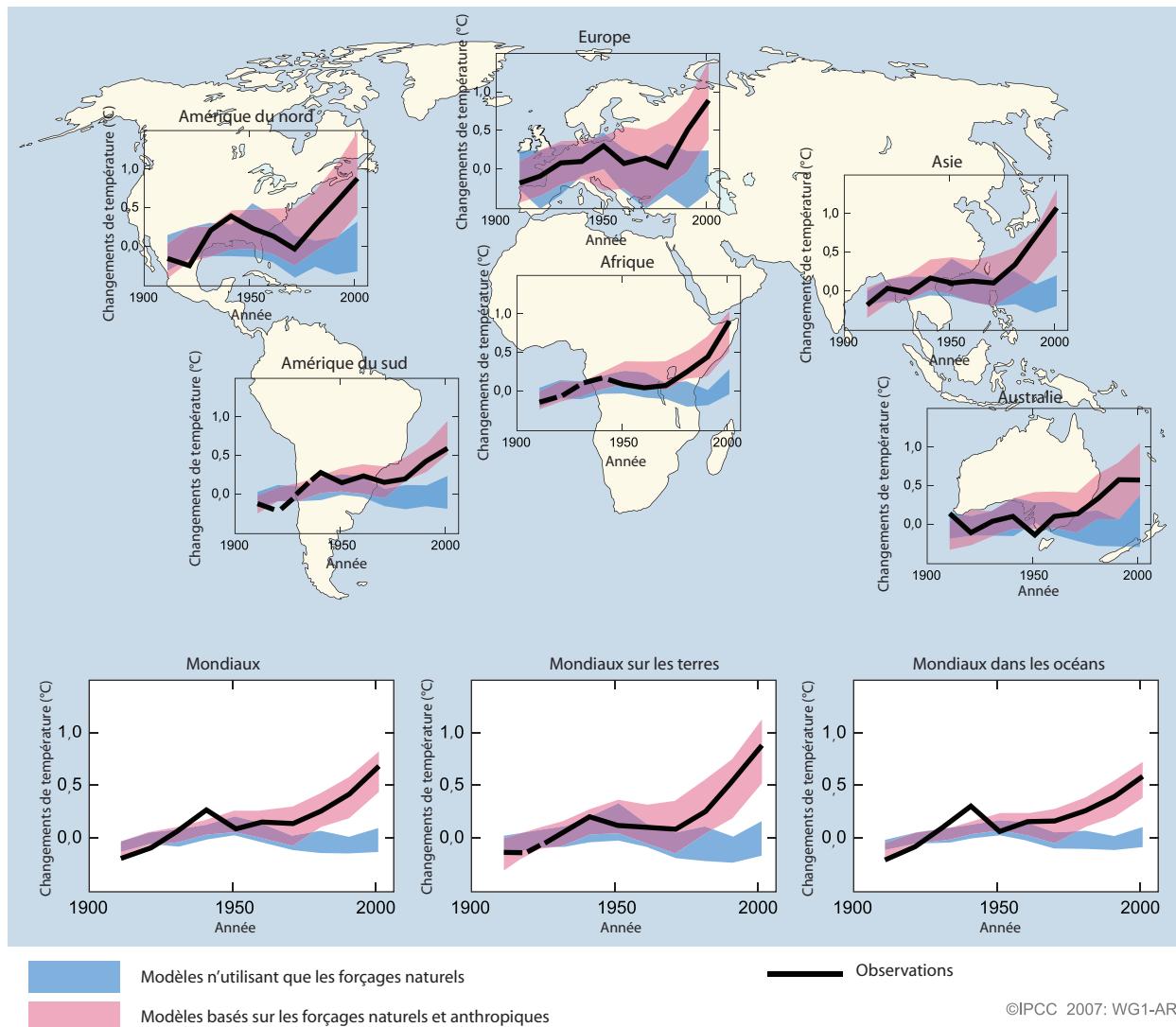
L'activité volcanique et les variations du rayonnement solaire font partie des facteurs naturels externes qui affectent le climat. Les éruptions volcaniques explosives propulsent de temps à autre de grandes quantités de poussières et d'aérosols sulfatés dans les hautes couches de l'atmosphère, obscurcissant temporairement la Terre et réfléchissant les rayons du soleil vers l'espace.

L'activité solaire suit un cycle de 11 ans et peut aussi être sujette à des variations de plus longue durée. Au cours des cent dernières années, les activités humaines, notamment la combustion de combustibles fossiles, ont provoqué une augmentation rapide de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Avant l'ère industrielle, la concentration de ces gaz était restée quasi stable des milliers d'années durant. Les activités humaines ont également contribué à l'augmentation dans l'atmosphère de fines particules réfléchissantes, les aérosols, notamment dans les années 1950 et 1960.

Bien que des mécanismes climatiques naturels internes, comme El Niño, puissent provoquer des variations dans la température globale moyenne pendant des périodes relativement courtes, les analyses indiquent que les variations actuelles sont en grande partie dues à des facteurs externes. De brèves périodes de refroidissement mondial ont suivi les éruptions volcaniques violentes, comme celle du Mont Pinatubo en 1991. Le début du XX^e siècle a connu une hausse de la température moyenne mondiale, et les concentrations de gaz de serre ont commencé à croître, le rayonnement solaire a probablement augmenté, tandis que l'activité volcanique est restée faible. Au cours des années 1950 et 1960, la température moyenne mondiale s'est stabilisée, l'accroissement d'aérosols provenant de combustibles fossiles et d'autres sources ayant refroidi la planète. L'éruption du Mont Agung en 1963 a également projeté de grandes quantités de poussières réfléchissantes dans les hautes couches de l'atmosphère. Le réchauffement accéléré, observé depuis les années 1970, s'est produit à une période où l'augmentation des gaz à effet de serre est le facteur prédominant.

De nombreuses expériences ont été réalisées au moyen de modèles climatiques pour déterminer les causes probables du réchauffement climatique du XX^e siècle. Ces expériences montrent que le réchauffement rapide observé au cours des quelques dernières décennies ne peut être reproduit par les modèles qui ne tiennent compte que des variations du rayonnement solaire et de l'activité volcanique. Cependant, comme le montre la figure 1, les modèles sont capables de simuler l'évolution des températures observée au XX^e siècle lorsqu'on y inclut tous les facteurs externes les plus importants, y compris les gaz à effet de serre anthropiques et autres facteurs naturels externes. Les réactions à ces facteurs externes, telles qu'estimées par les modèles, se retrouvent dans le climat du XX^e siècle dans le monde entier et dans chaque continent pris individuellement, à l'exception de l'Antarctique, où les observations sont insuffisantes. L'influence humaine sur le climat est très probablement la cause dominante des changements survenus dans les températures moyennes à la surface du globe durant le demi-siècle passé.

La connaissance incomplète de certains facteurs externes, comme les aérosols d'origine anthropique, représente égale-



FAQ 9.2, Figure 1. Évolution des températures par rapport aux moyennes correspondantes pour la période 1901-1950 (en °C), décennie en décennie entre 1906 et 2005 sur les continents, sur la planète, dans les terres émergées du globe et dans tous les océans (graphiques inférieurs). La courbe noire indique les variations observées des températures, les bandes de couleurs indiquent la fourchette mixte couverte par 90% des simulations de modèles récents. En rouge – les simulations comprenant les facteurs d'origine naturelle et humaine, en bleu – les simulations basées sur les seuls facteurs naturels. Les lignes noires en pointillé indiquent les décennies, ainsi que les régions continentales pour lesquelles les observations sont encore très peu nombreuses. Les explications détaillées de cette figure ainsi que les méthodes utilisées pour son établissement, se trouvent dans les Documents supplémentaires, Appendice 9.C.

ment une source d'incertitude. De plus, les modèles climatiques eux-mêmes sont imparfaits. Néanmoins, tous les modèles simulent un canevas de réponses aux augmentations de gaz à effet de serre d'origine humaine semblable à celui des changements tels qu'ils ont été observés. Dans ce canevas le réchauffement des terres est supérieur à celui des océans. Cette structure de changements, qui diffère des principales structures de variations des températures liées à la variabilité naturelle interne (El Niño), permet de distinguer les réactions aux gaz à effet de serre des réactions aux facteurs naturels externes. Modèles et observations montrent un réchauffement des couches inférieures de l'atmosphère (la troposphère) et un refroidissement de la stratosphère. C'est une autre « empreinte » de l'évolution qui témoigne de l'influence humaine sur le climat. Si, par exemple, une activité solaire plus intense avait été à l'origine du récent

réchauffement climatique, la troposphère et la stratosphère auraient, elles aussi, été touchées par ce réchauffement. De plus, les différences dans la durée des influences externes d'origine humaine et naturelle permettent de distinguer les diverses réactions du climat à ces facteurs. On peut raisonnablement en déduire que le facteur prédominant du réchauffement mondial observé depuis les 50 dernières années est d'origine anthropique et non naturelle.

Les estimations portant sur les températures dans l'hémisphère Nord au cours du dernier millénaire, voire des deux derniers, basées sur les « thermomètres » naturels, tels que les anneaux de croissance des arbres qui varient en densité et en largeur en fonction de la température, ainsi que les archives météorologiques, prouvent que le réchauffement du XX^e siècle ne peut être expliqué uniquement par la variabilité naturelle in-

terne et les facteurs naturels externes de forçage. La fiabilité de ces estimations est renforcée du fait que la plupart des variations des moyennes de la température dans l'hémisphère Nord avant l'ère industrielle peuvent s'expliquer par des refroidissements épisodiques ayant pour cause de fortes éruptions volcaniques et des changements dans le rayonnement solaire. La variation résiduelle correspond généralement à la variabilité simulée par

les modèles climatiques en l'absence de facteurs externes naturels et d'origine humaine. Bien que les estimations des températures du passé ne soient pas parfaitement certaines, elles n'en n'indiquent pas moins que la seconde moitié du XX^e siècle a été le demi-siècle le plus chaud depuis 1 300 ans. La variabilité climatique estimée due à des facteurs naturels est faible par rapport à l'intense réchauffement du XX^e siècle.

QUESTION FRÉQUENTE 10.1

S'attend-on à ce que les événements extrêmes, comme les vagues de chaleur, les sécheresses ou les inondations, changent en conséquence des changements climatiques sur Terre ?

Oui. Le type, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes devraient évoluer en conséquence des changements climatiques sur Terre, et ces évolutions peuvent se produire même si les changements climatiques moyens ne sont que de faible intensité. Des variations ont déjà été observées pour certains types de phénomènes extrêmes : notamment, augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et des fortes précipitations (voir FAQ 3.3).

Le réchauffement futur du climat risque d'entraîner un accroissement de l'intensité, la fréquence et la durée des vagues de chaleur. La canicule de 2003 en Europe est un exemple de ce genre de phénomène de chaleur extrême, pouvant s'étendre sur quelques jours ou sur plus d'une semaine, et que le réchauffement climatique futur risque vraisemblablement de banaliser. Ces températures extrêmes sont également associées à une baisse probable des écarts de la température diurne dans la plupart des régions. Il est tout aussi probable qu'avec le réchauffement, les jours de gel seront plus rares (donc également moins de nuits où la température chutera en-dessous de zéro). Le nombre de jours de froid extrême conditionnant la durée de la saison de croissance de la végétation, on prévoit que celle-ci s'allongera à mesure que le climat se réchauffera. Les pics de froid extrême, qui peuvent durer quelques jours ou plus d'une semaine, seront probablement moins fréquents dans la plupart des régions de l'hémisphère Nord. À l'exception, peut-être, de certaines régions situées dans l'ouest de l'Amérique du Nord, dans l'Atlantique Nord, en Europe du sud et en Asie, où des modifications de la circulation atmosphérique entraînent une diminution minimale des froids extrêmes.

Dans un climat futur plus chaud, la plupart des modèles de circulation générale du couplé atmosphère / océans (MCGAO) prévoient des étés plus secs et des hivers plus humides dans la plupart des régions situées à des latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord. Les étés secs laissent prévoir un risque accru de sécheresse. Parallèlement au risque d'aridification, on peut s'attendre à de fortes précipitations et à des inondations, du fait qu'une atmosphère plus chaude peut retenir davantage d'eau. Ce phénomène a déjà été observé et on s'attend à ce qu'il se reproduise encore, car sur une planète plus chaude, les précipitations ont tendance à se concentrer en événements plus intenses entrecoupés de périodes plus longues à pluviosité faible. C'est ainsi que des pluies torrentielles pourraient alterner avec des périodes relativement sèches, plus longues. Un autre aspect du change-

ment laisse prévoir des précipitations extrêmes plus importantes dans de nombreuses zones où l'on s'attend à une intensification des précipitations moyennes, et des extrêmes de sécheresse plus importants dans les zones où l'on s'attend à une diminution des précipitations moyennes.

Parallèlement à l'augmentation des extrêmes en matière de précipitations, l'intensité des pluies torrentielles augmenterait même si la force des vents tempétueux du climat futur restait stable. Pour l'hémisphère Nord notamment, les projections prévoient que les hivers deviendront probablement très humides dans une grande partie de l'Europe centrale et l'Europe du nord en raison de l'intensification des fortes pluies pendant les tempêtes. Elles suggèrent également un risque accru d'inondations en Europe et dans d'autres régions de moyenne latitude, dû à une intensification des précipitations de pluie et de neige, et donc à un écoulement plus important. Des résultats similaires peuvent s'appliquer aux précipitations estivales, impliquant des inondations accrues dans les zones asiatiques soumises aux régimes des moussons et dans d'autres zones tropicales. Le réchauffement risque d'accroître les inondations et les crues dans de vastes bassins fluviaux, et, à leur tour, les tempêtes de pluie intenses et les inondations. Certains de ces changements seraient le prolongement de tendances déjà existantes.

Les études de modélisations démontrent qu'à l'avenir, les cyclones tropicaux deviendront plus violents, avec des vents plus forts et des précipitations plus intenses. Les études semblent indiquer que de tels changements sont déjà en cours ; d'ailleurs, des indicateurs montrent que le nombre moyen des ouragans annuels de force 4 et 5 a augmenté au cours des trente dernières années. Les projections de certaines études de modèles prédisent une diminution des cyclones tropicaux dans le monde, en raison d'une troposphère tropicale plus stable sous un climat plus chaud, caractérisé par la réduction du nombre de tempêtes de faible intensité et par un plus grand nombre de tempêtes violentes. Quelques études de modèles prévoient également une tendance générale aux tempêtes plus violentes mais moins nombreuses dans les régions non tropicales, avec une tendance à des vents plus forts et des vagues océaniques plus hautes dans certaines régions, en raison de l'intensité accrue des événements cycloniques. D'après les projections des modèles, la trajectoire des tempêtes se décalera de quelques degrés de latitude en direction des pôles Nord et Sud.

QUESTION FRÉQUENTE 10.2

Les changements climatiques majeurs ou brusques, comme la disparition des nappes glaciaires ou des modifications de la circulation océanique mondiale, sont-ils probables ?

D'après les résultats actuellement disponibles des modélisations, le XXI^e siècle ne sera probablement pas le théâtre de changements climatiques brusques, tels que l'affondrement de l'inlandsis de l'Antarctique ouest, la perte de masse rapide de l'inlandsis groenlandais ou encore des modifications importantes des systèmes de la circulation océanique. Cependant, l'occurrence de tels changements devient de plus en plus envisageable à mesure que le climat se modifie.

Les analyses physiques, chimiques et biologiques des carottes de glace du Groenland et des sédiments marins provenant de l'Atlantique Nord et d'ailleurs, ainsi que de nombreuses archives climatiques concernant le climat du passé, ont démontré que les températures locales, les régimes des vents et les cycles hydrologiques peuvent rapidement se modifier en l'espace de quelques années seulement. En comparant les résultats des relevés effectués en différents points du globe, on s'aperçoit que des changements majeurs tant à l'échelle hémisphérique que mondiale se sont produits dans le passé. Ceci induit la notion d'un climat passé instable, ayant traversé des phases de changements brusques. Il y a donc lieu de s'inquiéter de ce qu'une croissance continue des concentrations de gaz à effet serre dans l'atmosphère puisse devenir une perturbation suffisamment importante pour que le système climatique change brusquement. De telles interférences avec le système climatique peuvent être dangereuses en raison des conséquences mondiales majeures qu'elles peuvent entraîner.

Avant d'examiner quelques exemples de tels changements, il serait opportun de définir les termes « brusque » et « majeur ». « Brusque » signifie que les rythmes des changements sont bien supérieurs à ceux de la perturbation qui les engendre ; autrement dit, la réaction est non-linéaire. Un changement climatique « majeur » est celui qui entraîne des changements au-delà de la variabilité naturelle en cours, et qui peut affecter plusieurs milliers de kilomètres, voire la planète entière. À l'échelle locale ou régionale, les changements brusques sont un aspect coutumier de la variabilité climatique naturelle. Les cas isolés de phénomènes de courte durée (le terme approprié étant plutôt « les événements extrêmes ») ne sont pas examinés ici, au contraire des changements à grande échelle qui évoluent rapidement et perdurent des années, voire des décennies. Les écarts de température dans l'est du Pacifique vers le milieu des années 1970, ou la diminution de la salinité jusqu'à 1 000 m de profondeur dans la mer du Labrador depuis le milieu des années 1980, sont des exemples concrets d'événements brusques ayant des conséquences locales et régionales, par opposition aux événements plus importants et de plus longue durée dont il est ici question.

On peut citer en exemple l'arrêt ou l'affaiblissement possibles du Gulf Stream, qui a largement attiré l'attention publique. Le Gulf

Stream est essentiellement un courant horizontal induit par les vents, au nord-ouest de l'océan Atlantique. Bien qu'étant un élément stable de la circulation océanique générale, son extrémité nord, qui alimente les eaux profondes des mers du Groenland, de la Norvège et de l'Islande, réchauffant ainsi ces mers et les côtes avoisinantes, est fortement tributaire de la modification de la densité des eaux de surface de ces mers. Ce courant constitue l'extrémité nord de la circulation thermohaline (CTH) qui longe les frontières occidentales du bassin atlantique. Les résultats des simulations de modèles climatiques montrent de façon cohérente que si la densité à la surface des eaux de l'Atlantique Nord décroît à cause du réchauffement ou de la diminution de la salinité, la puissance de la circulation thermohaline décroît également, et avec elle, la chaleur apportée dans ces régions. Toutes les projections de modèles climatiques indiquent qu'une diminution substantielle et durable de la salinité pourrait entraîner un affaiblissement considérable, voire l'arrêt complet de la circulation thermohaline. De tels changements se sont effectivement produits dans un passé lointain.

La question est maintenant de savoir si l'influence toujours croissante de l'homme sur l'atmosphère est suffisamment forte pour perturber la circulation thermohaline de manière telle qu'un pareil changement puisse se produire. L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère entraîne le réchauffement et l'intensification du cycle hydrologique, ce dernier diminuant la salinité des eaux de surface dans l'Atlantique Nord en raison des précipitations accrues qui entraînent un plus grand volume d'eau douce des régions fluviales dans l'océan. Le réchauffement provoque également la fonte des glaciers continentaux, ajoutant ainsi encore plus d'eau douce aux eaux de surface des océans dont la salinité décroît à mesure. Ces deux effets diminueront la densité des eaux de surface (qui doivent être suffisamment denses et lourdes pour s'enfoncer en profondeur et alimenter la circulation thermohaline), menant à l'affaiblissement de cette circulation au XXI^e siècle. On prévoit que cette réduction s'effectuera par paliers successifs, parallèlement au réchauffement : aucun des modèles actuels ne simule un affaiblissement brusque (non-linéaire) ou un arrêt complet de la circulation thermohaline dans le courant du XXI^e siècle. Les modèles qui simulent l'affaiblissement de la circulation thermohaline présentent encore une vaste gamme de possibilités, allant de la non-réaction à un affaiblissement supérieur à 50% vers la fin du XXI^e siècle. Ces divergences entre les modèles proviennent des différences dans la puissance des rétroactions entre l'atmosphère et l'océan simulées dans ces modèles.

Des incertitudes existent concernant le comportement à long terme de la circulation thermohaline. De nombreux modèles montrent qu'elle reviendra à la normale une fois le climat stabilisé. Mais d'autres modèles lui imposent des seuils qui sont dépassés lorsque

la force et la durée du forçage sont suffisantes. Dans de telles simulations, la circulation thermohaline subit un affaiblissement progressif qui continue même une fois le climat stabilisé. À ce stade, il est encore impossible de quantifier la vraisemblance d'un tel événement. Cependant, même s'il devait se produire, l'Europe serait malgré tout sujette au réchauffement, puisque le forçage radiatif provoqué par l'augmentation des gaz à effet de serre serait plus important que le refroidissement associé à l'affaiblissement de la circulation thermohaline. Les scénarios catastrophes prédisant le début d'une période glaciaire en conséquence de l'affaiblissement de la circulation thermohaline ne sont donc que de simples conjectures, et aucun modèle climatique n'a encore conduit à un tel résultat. En fait, les mécanismes conduisant à une période glaciaire sont assez bien compris et diffèrent tellement de ceux dont il est ici question que ce genre de scénario peut être exclu avec confiance.

Indépendamment de l'évolution à long terme de la circulation thermohaline, les simulations des modèles concordent en ce sens qu'elles prévoient que le réchauffement, ainsi que la diminution de la salinité qui en découle, affaibliront considérablement la formation des eaux profondes et intermédiaires dans la mer du Labrador au cours des prochaines décennies. Ce qui aura pour conséquence de modifier les caractéristiques des masses d'eau intermédiaires de l'Atlantique Nord et, à terme, les profondeurs de l'océan. Les effets à long terme de ces changements ne sont pas connus.

D'autres exemples de changements climatiques brusques, sujets d'amples discussions, sont la désintégration rapide de l'inlandsis groenlandais ou le brusque écroulement de l'inlandsis de l'Antarctique Ouest. Les simulations des modèles et les observations indiquent que le réchauffement dans les latitudes élevées de l'hémisphère Nord accélère la fonte de l'inlandsis groenlandais,

que l'accroissement de l'enneigement résultant de l'intensification du cycle hydrologique ne peut compenser. En conséquence, le rétrécissement de l'inlandsis groenlandais pourrait prendre des proportions considérables dans les siècles à venir. En outre, les résultats suggèrent qu'il existe un seuil thermique critique au-delà duquel l'inlandsis groenlandais disparaîtra complètement, et que ce seuil pourrait être dépassé au cours du siècle actuel. Toutefois, la fonte totale de l'inlandsis groenlandais, qui entraînerait une élévation mondiale du niveau de la mer d'environ sept mètres, est un processus de longue durée qui ne s'achèverait qu'au bout de nombreux siècles.

Des observations récentes par satellites et *in situ* des courants glaciaires qui se forment derrière les plates-formes glaciaires en désintégration mettent en évidence la rapidité d'une partie des réactions des systèmes des nappes glaciaires. Cela suscite d'autres inquiétudes concernant la stabilité de l'inlandsis de l'Antarctique Ouest dans son ensemble, dont l'effondrement pourrait faire monter le niveau de la mer de cinq à six mètres supplémentaires. Si ces courants semblent être contenus par la banquise qui s'étend devant eux, on ne sait pas encore si l'affaiblissement ou l'interruption de ce freinage, qui n'agit que sur une partie relativement faible de l'inlandsis, pourrait entraîner un déversement général de nombreux courants glaciaires et, de ce fait, déstabiliser complètement l'inlandsis de l'Antarctique Ouest. Les modélisations des inlandsis commencent seulement à inclure de tels mécanismes dynamiques de faible ampleur qui impliquent des interactions complexes entre le lit du glacier et l'océan bordant l'inlandsis. Les générations actuelles des modèles d'inlandsis ne fournissent donc aucune information quantitative sur l'éventualité d'un tel événement ou sa durée.

QUESTION FRÉQUENTE 10.3

Si les émissions de gaz à effet de serre diminuaient, à quel rythme la concentration de ces gaz dans l'atmosphère décroîtrait-elle ?

L'ajustement de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à une réduction de leurs émissions dépend de mécanismes physiques et chimiques qui éliminent les différents gaz de l'atmosphère. Les concentrations de certains gaz à effet de serre disparaissent presque immédiatement dès que leur émission diminue, tandis que d'autres peuvent continuer de croître des siècles durant, même si leurs émissions ont été réduites.

La concentration d'un gaz à effet de serre dans l'atmosphère dépend du rapport entre les taux d'émission de ce gaz dans l'atmosphère et la vitesse des processus qui l'en font disparaître. Par exemple, les échanges de dioxyde de carbone (CO_2) entre l'atmosphère, les océans et la terre s'effectuent par des transferts gazeux entre l'atmosphère et les océans, ainsi que par des mécanismes chimiques (dégradation) et biologiques (photosynthèse). Si plus de la moitié du CO_2 émis est actuellement éliminée de l'atmosphère en l'espace d'un siècle, une fraction du CO_2 émis (environ 20%) persiste dans l'atmosphère pendant des milliers d'années. Du fait de la lenteur du processus d'absorption, le CO_2 atmosphérique continuera à augmenter sur le long terme, même si son émission devait s'abaisser au-dessous des seuils actuels. Le méthane (CH_4) est absorbé dans l'atmosphère par des processus chimiques, tandis que l'oxyde nitreux (N_2O) et certains halocarbures sont détruits dans les couches supérieures de l'atmosphère par le rayonnement solaire. La durée de chacun de ces processus peut varier de quelques années à quelques millénaires. Elle peut se mesurer en fonction du temps de rémanence d'un gaz dans l'atmosphère, définie comme le temps nécessaire à une perturbation pour diminuer jusqu'à ne compter plus que pour 37% de son volume initial. Si la durée de vie du CH_4 , du N_2O et d'autres gaz

traces, comme l'hydrochlorofluorocarbure-22 (HCFC-22), un fluide de réfrigération, peut être déterminée avec assez de précision (environ 12 ans pour le CH_4 , 110 ans pour le N_2O et 12 ans pour le HCFC-22), celle du CO_2 ne peut être définie.

Les changements dans la concentration de tout gaz trace dépendent en partie de l'évolution de son émission dans le temps. Si les émissions augmentaient avec le temps, la concentration atmosphérique augmenterait également avec le temps, indépendamment du temps de rémanence du gaz dans l'atmosphère. Cependant, si des mesures étaient prises pour réduire les émissions, le sort de la concentration des éléments gazeux dépendrait des changements relatifs non seulement aux émissions, mais aussi à leurs processus d'élimination. Une explication de la manière dont la durée de vie et les processus d'élimination de différents gaz peuvent influencer l'évolution des concentrations lorsque les émissions sont réduites est fournie ici.

À titre d'exemple, la figure 1 présente des cas de figure illustrant les différentes réactions des futures concentrations de trois gaz traces à des changements divers de leurs émissions (représentées ici comme une réaction à une impulsion imposée aux changements dans les émissions). Prenons le CO_2 , qui n'a pas de durée de vie spécifique, ainsi qu'un gaz trace d'une longue durée de vie bien déterminée, de l'ordre d'un siècle (tel que le N_2O) ; prenons également un gaz trace ayant une durée de vie déterminée mais plus courte, de l'ordre d'une dizaine d'années (tel que le CH_4 , le HCFC-22 ou autres gaz halocarbonés). Chaque gaz a fait l'objet de cinq cas de figure d'émissions futures : stabilisation des émissions aux niveaux actuels, et réduction immédiate des émissions de 10%, 30%, 50% et 100%.

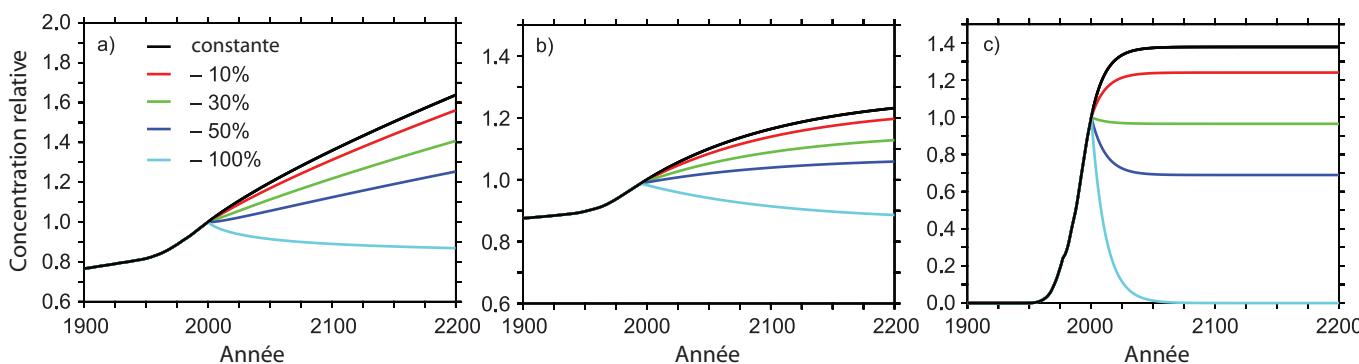


Figure 1. (a) Simulations des changements de la concentration du CO_2 atmosphérique par rapport aux conditions actuelles dans le cas d'émissions stabilisées au niveau actuel (en noir), ou se situant à -10% (en rouge), -30% (en vert), -50% (bleu foncé) et -100% (bleu clair) des niveaux actuels ; (b) identique à (a) pour un gaz trace d'origine naturelle et anthropique, dont le temps de rémanence est de 120 ans ; et (c) identique à (a) pour un gaz trace d'origine uniquement anthropique, dont le temps de rémanence est de 12 ans.

Le comportement du CO₂ (figure 1a) diffère totalement de celui des gaz traces à durée de vie déterminée. La stabilisation des émissions de CO₂ à leurs niveaux actuels entraînerait une augmentation constante de CO₂ atmosphérique durant le XXI^e siècle et plus tard, tandis que la stabilisation des émissions aux niveaux actuels d'un gaz dont la durée de vie serait d'un siècle environ (figure 1b) ou d'une décennie (figure 1c) stabiliserait sa concentration à un niveau supérieur à celui d'aujourd'hui d'ici deux siècles, ou deux décennies, respectivement. En fait, ce n'est que dans le cas d'un arrêt quasi complet des émissions que la concentration atmosphérique en CO₂ serait finalement stabilisée à un niveau constant.

Tous les autres cas de réduction modérée d'émission de CO₂ montrent des concentrations croissantes dues aux mécanismes d'échange typiques associés au cycle du carbone dans le système climatique.

Plus précisément, de nos jours les taux d'émissions de CO₂ dépassent largement ceux de leur absorption ; une absorption lente et incomplète signifie que des réductions faibles à modérées des émissions de CO₂ n'entraîneraient pas la stabilisation de ses concentrations, mais se contenteraient de réduire son taux de croissance au cours des décennies à venir. Il faudrait diminuer les émissions de CO₂ de 10% pour abaisser de 10% son taux de croissance ; de même, une réduction de 30% des émissions réduirait de 30% le taux de croissance du CO₂ atmosphérique. Une réduction de 50% stabiliserait le CO₂ atmosphérique, mais pas au-delà d'une décennie. Au-delà, il faudrait s'attendre à une nouvelle augmentation du CO₂ atmosphérique à mesure que l'absorption par les

puits terrestres et océaniques s'affaiblirait par des mécanismes d'ajustements chimiques et biologiques bien connus. On estime que l'arrêt total des émissions de CO₂ amènerait une lente diminution du CO₂ atmosphérique d'environ 40 ppm au cours du XXI^e siècle.

Il en va tout à fait différemment des gaz traces ayant une durée de vie déterminée. À titre d'exemple, pour un gaz trace dont temps de rémanence est d'environ un siècle, comme le N₂O, il faudrait une réduction des émissions supérieure à 50% pour stabiliser les concentrations à un niveau approchant le niveau actuel (figure 1b). Des émissions constantes amèneraient la concentration à se stabiliser dans quelques siècles.

Dans le cas d'un gaz ayant une courte durée de vie, les déperditions actuelles avoisinent 70% des émissions. Une réduction des émissions inférieure à 30% produirait encore dans ce cas une brève augmentation de la concentration mais, à l'inverse du CO₂, la stabilisation de sa concentration surviendrait au bout d'environ 20 ans (figure 1c). L'abaissement du niveau auquel la concentration d'un tel gaz se stabiliserait est directement proportionnel à la réduction de son émission. De cette façon, dans le cas de figure donné, il faudrait une réduction supérieure à 30% des émissions de ces gaz traces pour que les concentrations se stabilisent à des niveaux bien plus bas que les niveaux actuels. Un arrêt complet des émissions de gaz traces ayant une durée de vie d'une dizaine d'années ramènerait le monde en moins d'un siècle aux niveaux de concentrations existant à l'époque préindustrielle.concentrations existant à l'époque préindustrielle.

QUESTION FRÉQUENTE 11.1

Est-ce que les changements climatiques projetés varient d'une région à l'autre ?

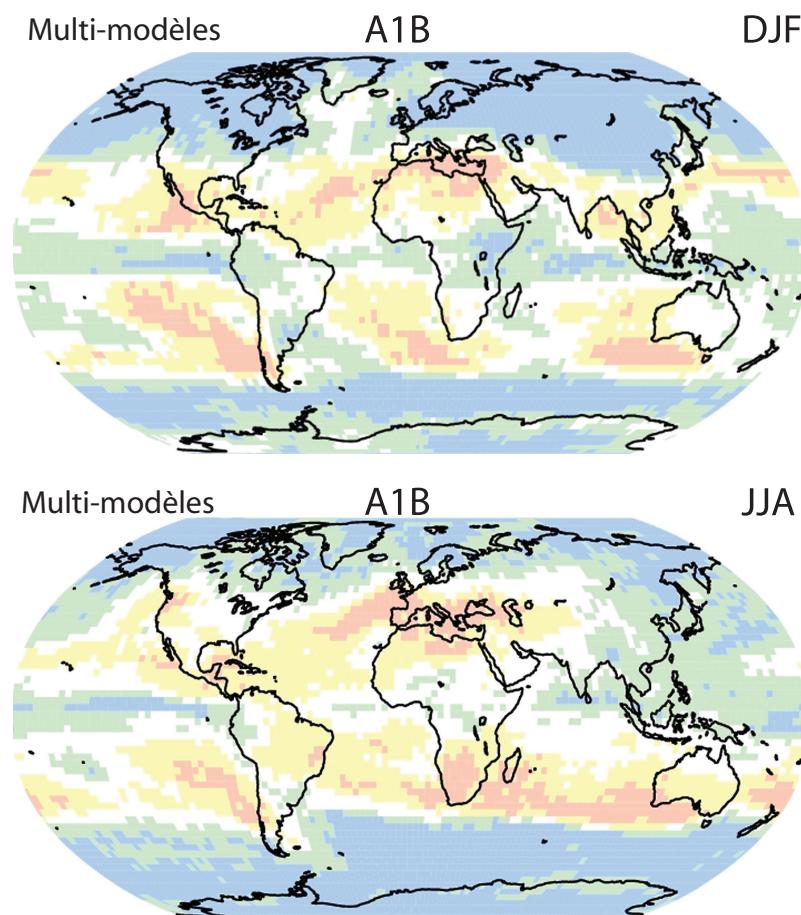
Le climat varie d'une région à l'autre. Cette variation provient de la répartition irrégulière de la chaleur solaire, des diverses réactions de l'atmosphère, des océans et de la surface des terres, de leurs inter-réactions, ainsi que des particularités physiques des régions. Les perturbations des composants atmosphériques entraînant des changements à l'échelle mondiale touchent certains aspects de ces inter-réactions complexes. Si certains facteurs de changements climatiques d'origine anthropique (« forçages ») sont uniformément présents dans la nature, d'autres varient d'une région à l'autre. Le dioxyde de carbone, par exemple, qui est une des causes du réchauffement, est réparti de manière égale sur la planète, indépendamment de l'origine de son émission ; tandis que la répartition des aérosols sulfatés (particules minuscules), qui compensent légèrement le réchauffement, est plutôt régionale. En outre, la réponse aux forçages est en partie régie par les mécanismes de rétroaction qui peuvent se produire dans des régions autres que celles où le forçage est le plus puissant. Les changements climatiques projetés varieront donc aussi d'une région à l'autre.

Pour savoir comment les changements climatiques affecteront une région, il faut considérer sa latitude. Par exemple, bien que l'on s'attende à un réchauffement sur toute la planète, dans l'hémisphère Nord la tendance générale du réchauffement prévu va croissant des tropiques vers les pôles. La question des précipitations est plus complexe, mais certains aspects dépendent malgré tout de la latitude. Sous des latitudes quasi polaires les précipitations devraient augmenter, tandis qu'elles diminueront près des tropiques (voir figure 1). On prévoit des précipitations accrues pendant les saisons des pluies (notamment les moussons) et, en particulier, dans les régions tropicales du Pacifique.

La distance des océans et des chaînes de montagnes est un autre facteur important. En règle générale, l'intérieur des terres devrait se réchauffer plus vite que les zones côtières. Les réponses aux précipitations dépendent non seulement de la géométrie continentale, mais du relief des montagnes avoisinantes et de la direction des vents dominants. Les moussons, les cyclones extratropicaux et les ouragans/typhons sont tous affectés différemment par ces particularités géographiques.

Lorsqu'il s'agit de comprendre et de projeter

les changements climatiques régionaux, l'une des difficultés est de prévoir l'évolution possible de la circulation atmosphérique, océanique, ainsi que les schémas de leur variabilité. Bien que l'on puisse parfois faire des observations d'ordre général pour diverses régions au climat qualitativement similaire, il n'en reste pas moins que pratiquement chaque région présente des caractères idiosyncratiques. Cela est avéré tant pour les zones côtières subtropicales de la Méditerranée que pour le climat extrême de l'intérieur des terres de l'Amérique du Nord qui dépend de l'apport d'humidité en provenance du Golfe du Mexique, ou encore pour les interactions entre la répartition de la végétation, les températures océa-



FAQ 11.1, Figure 1. On s'attend à ce que vers la fin du siècle, les zones en bleu et en vert sur la carte soient sujettes à des précipitations accrues, alors que les zones en jaune et en rose seraient plus sèches. La carte supérieure indique des projections pour les mois de décembre, janvier et février, celle du bas indique des projections pour les mois de juin, juillet et août.

niques et la circulation atmosphérique qui régissent l'extrémité sud du désert saharien.

Si établir un équilibre cohérent entre les facteurs mondiaux

et régionaux représente un défi scientifique, ces facteurs étant de mieux en mieux compris, la confiance dans les projections régionales ne fait que croître.