

Le changement climatique : mécanismes et perspectives

Changement climatique

Le climat de la Terre est changeant. C'est une réalité que l'on a mis quelque temps à découvrir puisqu'il a fallu attendre le début du XIX^e siècle pour la mettre en évidence [Référence 1]. Le principal ouvrier de cette découverte a été le paléontologue suisse Louis Agassiz qui a fait admettre au monde scientifique l'idée que la Terre avait, jadis, connu un âge de la glace dont le témoignage était maintenant porté par les traces de l'activité de très grands glaciers : moraines et roches polies et striées.

Depuis lors, bien d'autres moyens ont été trouvés pour reconstituer l'histoire climatique. Parmi ceux-ci se trouvent notamment l'étude des sédiments, marins ou lacustres, et celle des glaces, particulièrement celles des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland, tous matériaux qui ont, à des titres et à des degrés divers, enregistré les climats du globe [2].

L'histoire commence il y a 4,57 milliards d'années, au moment où se forme le système solaire, et donc la planète que nous habitons. Le début de cette histoire, cependant, ne nous est pas accessible faute de sédiments, la formation de ceux-ci exigeant la présence d'eau liquide. Pour en avoir, il a fallu attendre que la Terre soit suffisamment refroidie pour que la vapeur d'eau se condense en pluies alimentant des fleuves nourrissant les océans. Alors, il y a 3,8 milliards d'années, les sédiments ont pu se former. Leur étude géochimique montre que les eaux étaient alors encore très chaudes : 70 °C, semble-t-il, entre 3 et 2 milliards d'années, avant de se refroidir aux environs de 30 °C à 40 °C il y a un demi-milliard d'années. Mais ces temps anciens n'ont certainement pas toujours été chauds, car on

y connaît trois importantes périodes glaciaires, centrées respectivement autour de 2,8, 2,4 et 0,7 milliards d'années (figure 1).

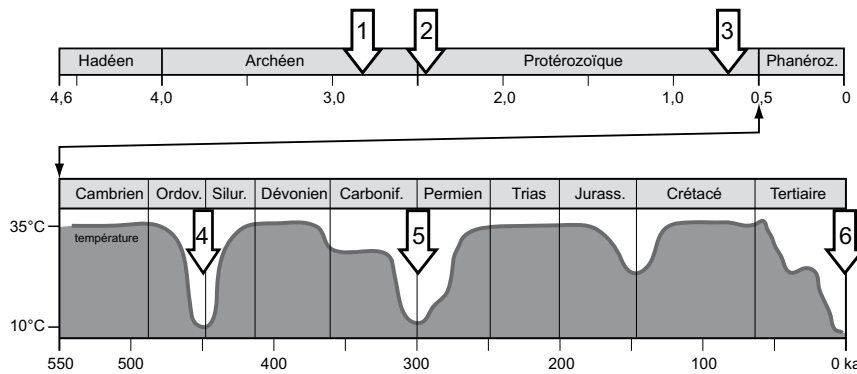


Figure 1. Variations climatiques majeures des temps géologiques.

Ce diagramme, très schématique, tente de représenter les variations climatiques majeures de la Terre. Les périodes glaciaires sont indiquées par des flèches numérotées de 1 à 6. La Terre montre, dans l'ensemble, un climat majoritairement chaud, dominé par un effet de serre notable. Il est coupé par des périodes de glaciation.

Dans cette dernière période, dite protérozoïque, on distingue trois grandes glaciations : sturtienne, marinoenne et de Gaskiers (respectivement vers 730, 635 et 580 millions d'années). Au moins pour les deux premières, leur grande étendue sur le globe, et le fait que des indices convaincants tendent à montrer que leurs glaces pouvaient se trouver à de très basses altitudes près de l'équateur, ne semblent pouvoir s'interpréter qu'en imaginant une terre entièrement couverte de glaces, glaciers ou banquise. C'est l'hypothèse dite de la Terre boule de neige (*Snowball Earth*) [3]. Une telle situation, où dans sa blancheur, c'est-à-dire du fait de son albédo élevé, la Terre renverrait vers l'espace la plus grande partie du rayonnement solaire, conduirait à un blocage du climat dans cet état glaciaire.

Pour en sortir, ce qui s'est forcément produit compte tenu de l'histoire postérieure, il faut invoquer un très fort accroissement de l'effet de serre atmosphérique du fait des émissions de gaz, notamment du dioxyde de carbone, par le volcanisme, jusqu'à atteindre une concentration telle que la température s'élève suffisamment pour faire fondre les glaces, ce qui a dû prendre des millions d'années.

C'est juste après ces épisodes glaciaires que l'on enregistre les premiers fossiles d'animaux métazoaires, d'abord sans squelette (faune d'Ediacara, il y a 575 millions d'années), puis avec un squelette externe, avec notamment les Trilobites, il y a 540 millions d'années.

Le climat terrestre des temps qui suivent est, dans l'ensemble, relativement chaud, ou tiède, c'est-à-dire que les glaces y sont rares, parfois pratiquement absentes. Trois périodes glaciaires viennent cependant couper cette tiédeur. L'une, à l'Ordovicien, il y a 445 millions d'années, est relativement courte et a comme particularité d'avoir laissé des moraines en plein milieu de l'actuel Sahara. Une autre, au Carbonifère et au Permien, a duré bien plus longtemps, s'étant étalée, avec des hauts et des bas, de 360 à 260 millions d'années. Une troisième caractérise le Quaternaire, c'est-à-dire la période où nous vivons.

En fait, ce dernier refroidissement du climat a commencé il y a 50 millions d'années (figure 2) et, il y a une trentaine de millions d'années, a conduit à la construction d'un début de calotte glaciaire sur l'Antarctique.

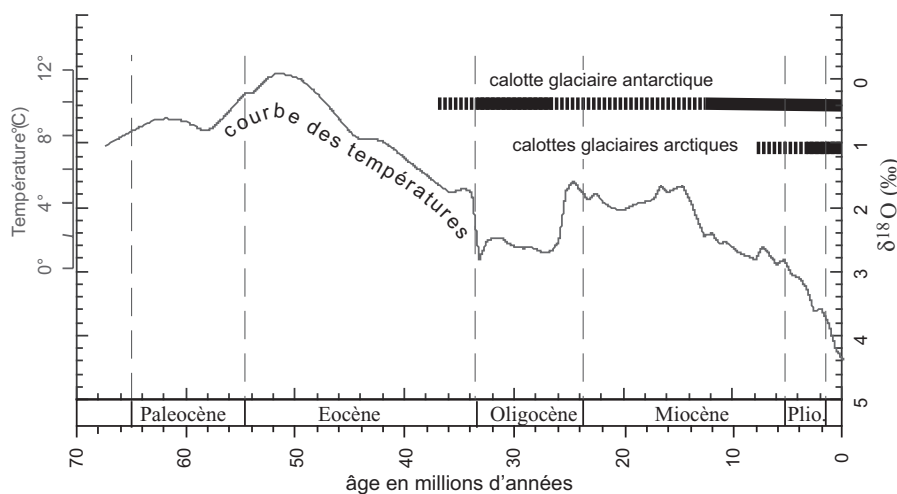


Figure 2. Evolution de la température de l'océan global durant le Cénozoïque.

La température des eaux océaniques (échelle de gauche) a été calculée à partir de la composition en isotopes de l'oxygène du test de foraminifères benthiques (échelle de droite, $\delta^{18}\text{O}$) pour un océan libre de glaces, et ne vaut donc que pour la période précédant la mise en place de la glaciation antarctique, il y a 35 millions d'années. Depuis le début de l'Oligocène jusqu'à aujourd'hui, les changements dans les isotopes reflètent les changements dans le volume des glaces des calottes polaires. Des barres horizontales donnent une représentation approximative des volumes de glace dans chaque hémisphère par rapport au dernier maximum glaciaire, les sections en tirets représentant les périodes de minimum (moins de 50 %) et les sections pleines les périodes de maximum (plus de 50 %). D'après Zachos, J. *et al.*, (2001) *Science*, 292 (5517), p. 686-693.

Ensuite, pendant une quinzaine de millions d'années, s'est déroulée une période de rémission, et même de léger réchauffement. Mais, à partir de 15 millions d'années, le refroidissement a été constant et a abouti, il y a entre 3 et 2 millions d'années, à l'édification de calottes glaciaires dans l'hémisphère Nord. Pour fixer les idées, on retient comme repère caractéristique de ce qui est considéré comme l'entrée dans la glaciation le début du Quaternaire, depuis peu fixé à 2,588 millions d'années.

Les travaux menés sur ces glaciations durant le XIX^e siècle, essentiellement appuyés sur des observations morphologiques (moraines et terrasses fluviatiles) avaient amené à la conclusion qu'elles montraient des phases successives. Ces idées ont été concrétisées au début du XX^e siècle par un ouvrage de A. Penck et E. Brückner [4], lesquels comptaient quatre glaciations, désignées, dans l'ordre chronologique, par les noms de Günz, Mindel, Riss et Würm. On en a bientôt caractérisé deux autres, plus anciennes : Biber et Donau. Les travaux récents, appuyés par des analyses isotopiques portant sur les sédiments et leur contenu en fossiles, ainsi que sur les glaces, ont modifié radicalement cette manière de voir, et l'on dénombre maintenant de bien plus nombreuses phases glaciaires (figure 3) : une dizaine dans le dernier million d'années. Clairement, les méthodes anciennement utilisées n'avaient pas permis de discriminer ces phases, sauf la plus récente, le Würm, qui correspond au dernier glaciaire. Si l'on divise cette durée d'un million d'années par les dix phases qu'on

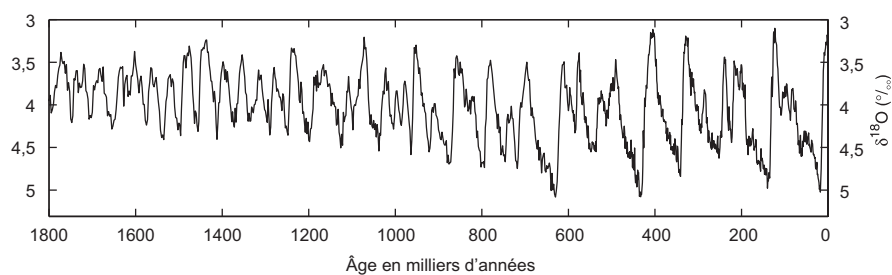


Figure 3. Cycles glaciaires du Quaternaire.

Ces cycles sont mis en évidence par les variations de la composition en isotopes de l'oxygène de tests de foraminifères benthiques prélevés dans des carottes océaniques. Les fortes valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ (échelle inversée) correspondent à des maximums de glace (phases glaciaires) et les faibles valeurs à des minimums (interglaciaires). On note une nette composante de période 100 000 ans, très nette à partir d'un million d'années. D'après Lisiecki, L.E., & Raymo, M.E., (2005) *Paleoceanography*, 20, PA1003.

y voit aujourd'hui, on peut dire qu'en moyenne une de ces phases dure 100 000 ans. Et c'est bien à ce rythme qu'elles se succèdent, rythme qui, nous le verrons plus loin, a trouvé son explication.

Ces changements climatiques ont eu une profonde influence sur les environnements. On peut en juger particulièrement par les changements dans la répartition des espèces végétales que l'on décèle grâce à l'étude des associations de grains de pollen extraits de carottes des sédiments de lacs, de tourbières ou de mers. En Europe occidentale, par exemple, on peut voir que les forêts, largement étendues à l'Eémien, période interglaciaire précédant la dernière glaciation, font, au cours de celle-ci, progressivement place à des steppes qui, à leur tour, sont remplacées par des forêts lorsque intervient la dernière déglaciation (figure 4). Bien évidemment, ces variations dans le couvert végétal ont été la cause de modifications dans la répartition des faunes et, sans doute aussi, dans les processus et les cheminements de leurs évolutions. Cependant, il est encore difficile de préciser les modalités et les mécanismes de ces modifications. Tout au plus peut-on poser que l'évolution des êtres vivants a certainement été très influencée par des épisodes de disparition, en un temps relativement court, de très nombreuses espèces, disparitions souvent qualifiées de crises du vivant, dont les causes, encore peu claires, sont très vraisemblablement en relation plus ou moins directe avec des processus climatiques.

Mécanismes

Les changements climatiques variés intervenus sur notre planète exigent des explications. L'énergie du système climatique nous étant presque totalement fournie par le Soleil, c'est dans l'intensité et dans la répartition du rayonnement de celui-ci que doivent se trouver les principales causes des variations climatiques. Mais ce rayonnement s'exerce sur une planète pourvue d'une atmosphère dont la composition influe sur la température de ses différentes couches, notamment par effet de serre, et qui échange matière et énergie avec les océans, autre composante du système climatique. Enfin, la Terre elle-même a une activité qui se manifeste par un déplacement et des déformations des continents, ainsi que par du volcanisme, émetteur de gaz divers.

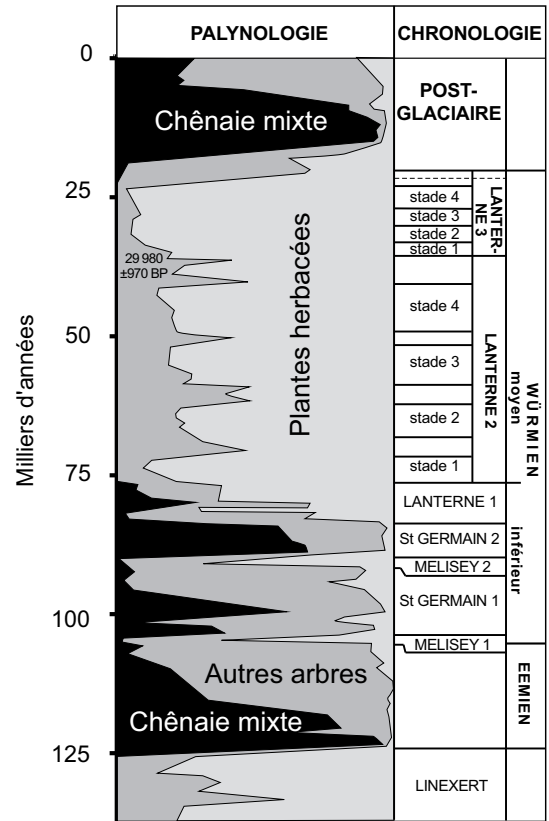


Figure 4. Diagramme pollinique simplifié de la tourbière de la Grande-Pile (Saint Germain, Haute-Saône, France).

Ce diagramme classique (modifié d'après Woillard, G. M. (1978) *Quat. Res.*, 9 (1), p. 1-21), qui a été complété par des travaux postérieurs (voir Beaulieu, J.-L. de, & Reille, M. (1992) *Quat. Sci. Rev.*, 11, p. 431-438), montre très clairement l'effet des grandes variations climatiques sur le paysage végétal. Les périodes où les plantes herbacées sont majoritaires correspondent au développement des steppes durant les périodes glaciaires arides. Les périodes où les végétaux arborés dominent (chênaie) correspondent à des intervalles moins froids et plus humides. Vers le haut du diagramme, la diminution de la chênaie mixte correspond aux défrichements anthropiques.

Le rayonnement solaire

Le rayonnement du Soleil présente des variations d'intensité de deux ordres. A longue échéance, comme toutes les étoiles, son éclat se modifie lentement. Lors de la formation de la Terre, on calcule que sa luminosité était plus faible qu'aujourd'hui de 30 %. Ce « soleil faible » était pa-

radicalement capable d'entretenir sur terre une température élevée : on en conclut habituellement qu'un effet de serre très intense devait exister, résultant d'une très forte concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone d'origine volcanique.

A courte échéance, la luminosité solaire montre des variations périodiques. Plusieurs périodicités semblent exister, mais la plus visible est celle de quelque 11 années, marquée aussi par une variation du nombre des taches solaires. De vrai, ces variations d'intensité lumineuse sont minimes : guère plus de 0,1 %. Mais on leur a prêté des effets climatiques. C'est, par exemple, le Petit âge glaciaire, léger refroidissement observé du XVII^e siècle au XIX^e siècle que l'on a voulu expliquer par une baisse de l'activité du Soleil marquée par la disparition de ses taches entre 1650 et 1700. Mais les preuves d'une liaison causale peinent à être apportées. On a cherché à y voir aussi une explication de la variabilité climatique que l'on peut détecter depuis que les instruments de mesure le permettent ; mais, là aussi, il est apparu difficile d'en apporter les preuves. En définitive, le rôle des périodicités de l'activité solaire sur les climats est encore un sujet de controverse.

L'effet du Soleil sur le climat dépend aussi de la façon dont son rayonnement est réparti à la surface du globe. On sait que cette répartition dépend de la latitude, l'insolation étant en moyenne bien plus grande à l'équateur qu'aux pôles. Mais cette répartition varie dans le temps du fait des irrégularités du mouvement de la Terre autour du Soleil, qui sont conditionnées par les attractions de la Lune et des planètes. Ainsi, la répartition de l'insolation selon les latitudes varie selon des rythmes imposés par les combinaisons de ces attractions, avec des périodicités (figure 5) qui sont celles de la précession des équinoxes (période d'environ 21 000 ans), de l'inclinaison de l'axe de la Terre sur l'écliptique (environ 40 000 ans), et de celles de l'excentricité de l'orbite terrestre (100 000 ans et 400 000 ans). La théorie selon laquelle le climat est rythmé par ces périodicités a été largement développée par un mathématicien serbe, Milutin Milankovitch [5], si bien que, pour ces périodicités climatiques, on parle souvent de cycles de Milankovitch. Ces derniers sont particulièrement apparents dans les phases glaciaires du Quaternaire qui, nous l'avons signalé plus haut, se succèdent, vers la fin, à un rythme de 100 000 ans. On y trouve aussi, moins accusés mais bien mis en évidence par analyse spectrale, les rythmes de 40 000 ans et de 21 000 ans.

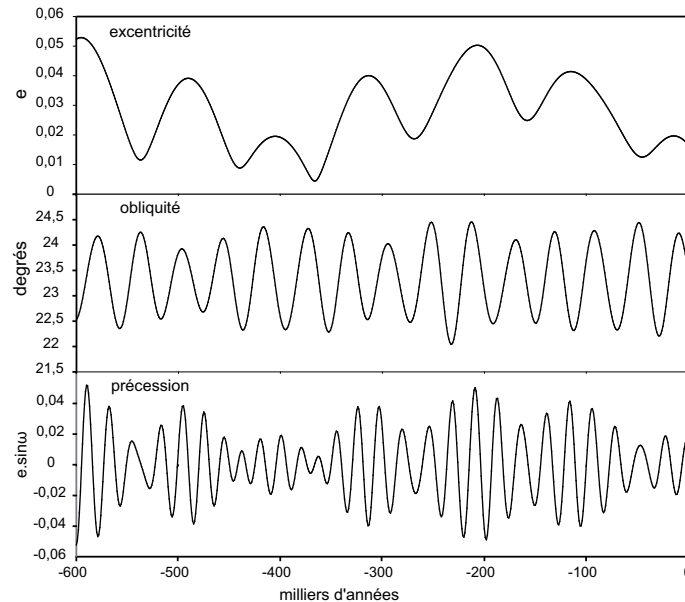


Figure 5. Variation de l'obliquité, de la précession et de l'excentricité depuis 600 000 ans.

Ce graphique montre que ces variations sont quasi périodiques, avec des périodes dominantes d'environ 100 000 ans pour l'excentricité, 40 000 ans pour l'obliquité et 21 000 ans pour la précession.

L'atmosphère

Si le rayonnement s'exerçait sur une Terre sans atmosphère, la température moyenne de celle-ci serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il n'en est rien, heureusement, car elle est, près du sol, d'environ $14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette différence de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ s'explique par l'effet de serre que certains gaz (la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone, etc.) exercent. Ces gaz sont, en effet, absorbants pour les infrarouges. Les rayonnements solaires visibles qui les traversent échauffent le sol qui, du fait de cet échauffement, émet des radiations infrarouges (on le sent bien en approchant la main d'un mur longtemps échauffé dans la journée par un puissant soleil).

Ces rayonnements infrarouges ne peuvent facilement retraverser l'atmosphère du fait des gaz qui les absorbent, et sont en partie réémis vers le sol, ce qui échauffe davantage les basses couches atmosphériques : c'est ce que l'on nomme l'effet de serre, par analogie avec ce qui se passe dans

une serre dont les verrières laissent, elles aussi, difficilement passer les rayons infrarouges. Les températures au sol dépendent donc beaucoup de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

L'énergie interne de la Terre

Si l'énergie qui nous vient de la Terre elle-même, du fait des réactions nucléaires se produisant dans son sein, ne représente que 0,02 % de l'énergie qui nous vient du Soleil, elle n'est pas négligeable du point de vue climatique, et cela pour deux raisons. L'une est que, par chauffage, elle engendre des mouvements de convection dans le manteau terrestre, lesquels sont à l'origine du mouvement des plaques lithosphériques. En entraînant les continents, ces plaques les déplacent à la surface du globe, ce qui engendre des modifications climatiques liées à leur position, notamment selon leur latitude. Par ailleurs, ces déplacements perturbent les courants océaniques, séparent ou réunissent des continents, édifient des reliefs, toutes opérations d'où résultent des modifications climatiques. Ces phénomènes sont très lents et exigent des millions d'années pour avoir un effet appréciable.

Une autre raison est que cette énergie est à l'origine du volcanisme, et donc du flux de gaz à effet de serre que celui-ci injecte dans l'atmosphère. Ces gaz ont joué un rôle très important au début de l'histoire de la Terre. Plusieurs auteurs leur donnent le premier rôle dans la survenance des crises biologiques qui, au cours des temps géologiques, ont vu disparaître des quantités d'espèces.

Perspectives

Compte tenu de ce que nous savons des causes des variations climatiques, on peut chercher à prévoir ce que sera le climat de demain. Certaines de ces causes, comme les cycles astronomiques, ne jouent qu'à très longue échéance, et si elles intéressent le scientifique, elle ne touchent que médiocrement ceux dont la préoccupation majeure est leur avenir et celui de leurs enfants et petits-enfants. D'autres sont plus immédiates et, parmi celles-là, la concentration en gaz à effet de serre que produisent bien de nos activités, notamment industries et transports, essentiellement du fait de l'usage de combustibles fossiles, charbon et pétrole.

C'est un fait que ces concentrations ont augmenté dans l'atmosphère depuis le XIX^e siècle (figure 6). La concentration du dioxyde de carbone était alors de 280 ppm (parties par million, ou millionnièmes de concentration dans l'atmosphère) en volume, alors qu'elle a atteint 386 ppm en moyenne pour l'année 2008, soit une augmentation de 38 %. Cette augmentation, et celle d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane, expliquent en très grande partie l'augmentation des températures de la troposphère. Depuis les années 1910, elle s'est élevée de près de 1 °C (figure 7). Cependant, on note, dans cette augmentation, bien des irrégularités, comme une baisse des températures vers les années cinquante, qui ne sont pas bien comprises, certains auteurs cherchant à y voir l'effet des variations de l'activité solaire, du volcanisme ou de réponses propres du système climatique.

D'autres effets climatiques ont été observés, comme l'a noté le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC [6]), dont nous résumons les propos. Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 1,8 mm/an depuis 1961 et de 3,1 mm/an depuis 1993, sous l'effet de la dilatation thermique et de la fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires polaires. Depuis 1978, l'étendue annuelle moyenne des glaces de mer a diminué de 2,7 % par décennie dans l'océan Arctique, avec un recul plus marqué en été (7,4 %). Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud. Il est probable que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années soixante-dix. Les observations révèlent une augmentation de l'activité cyclonique intense dans l'Atlantique Nord depuis 1970 environ. On peut affirmer avec un degré de confiance élevé que les changements intervenus dans le manteau neigeux, les glaces et le gélisol se sont traduits par une multiplication et une extension des lacs glaciaires, une instabilité accrue des sols dans les régions montagneuses et d'autres zones à pergélisol et des modifications de certains écosystèmes en Arctique et en Antarctique.

Dans les écosystèmes terrestres, le caractère hâtif des phénomènes printaniers et la migration d'espèces animales et végétales vers les pôles et vers les hauteurs sont associés au réchauffement récent avec un degré

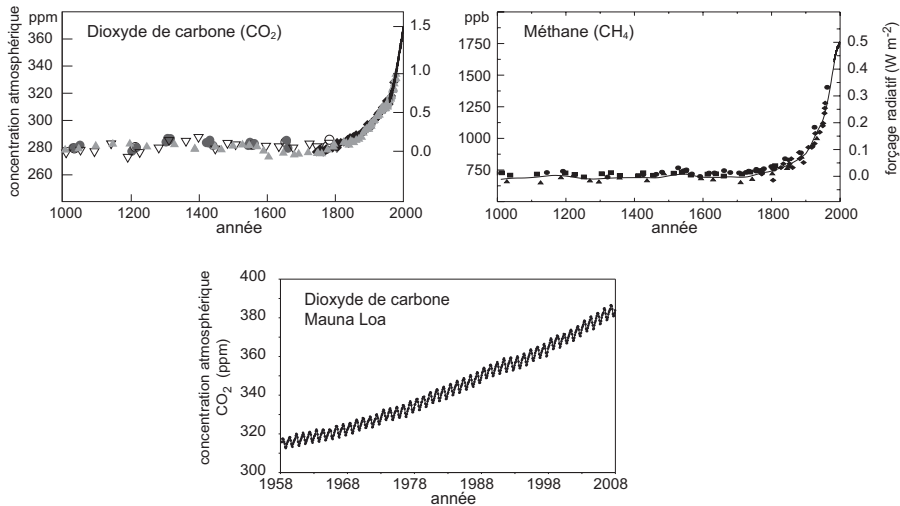


Figure 6. Evolution de la concentration de l'atmosphère en dioxyde de carbone et méthane.

La concentration de ces gaz dans l'atmosphère est restée à peu près la même jusqu'au XIX^e siècle. A partir de là, leur accroissement est net : de 280 ppm à 386 ppm en 2008, soit 38 %. Les mesures directes (en bas le détail de celles faites à l'observatoire du Mauna Loa depuis 50 ans) ne datent que de quelques décennies, les données antérieures provenant de l'analyse de bulles d'air piégées dans les glaciers. Source : IPCC (2001) *Third Assessment Report, Working Group I* et Observatoire du Mauna Loa.

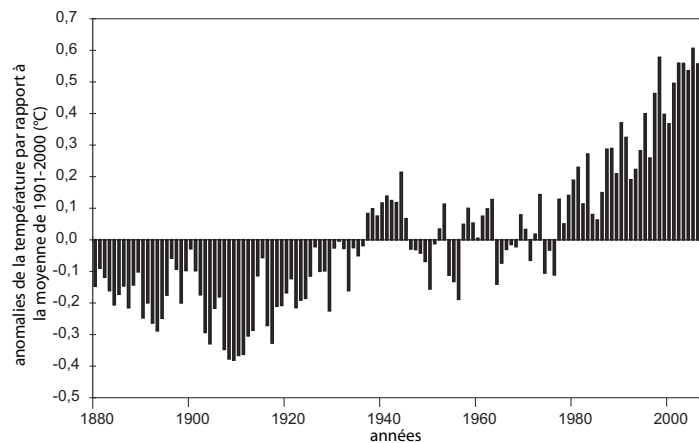


Figure 7. Anomalies de température mondiale par rapport à la moyenne de 1901-2000 (°C).

On est capable d'avoir de très bonnes estimations de la température moyenne mondiale, grâce à des mesures directes, depuis la fin du XIX^e siècle. On constate que, depuis les années 1910 et jusqu'à nos jours, cette température s'est élevée de près de 1°C. Cette augmentation est généralement attribuée à un effet de serre croissant avec la concentration de l'atmosphère en CO₂ et en CH₄. Les irrégularités de cette montée sont plus difficiles à expliquer, les causes invoquées étant diverses (volcanisme, variations de l'activité solaire, réactions propres du système climatique, etc.). Données NOAA pour la température globale (continents et océans).

de confiance très élevé. Dans certains écosystèmes marins et d'eau douce, le déplacement des aires de répartition et les variations du degré d'abondance des algues, du plancton et des poissons sont liés à la hausse de la température de l'eau ainsi qu'aux modifications connexes de la couche de glace, de la salinité, de la teneur en oxygène et de la circulation de l'eau. Les changements climatiques régionaux commencent à avoir d'autres effets sur le milieu naturel et l'environnement humain, bien que nombre de ces effets soient difficiles à cerner en raison de l'adaptation et des facteurs non climatiques.

Dans la mesure où notre production en gaz à effet de serre ne cesse pas, il est inéluctable que leurs effets climatiques persistent dans l'avenir. Ces effets ont été modélisés et évalués par le GIEC. Cet avenir dépend évidemment de la façon dont nos sociétés évolueront, notamment en ce qui concerne l'usage des énergies fossiles. Comme il n'est manifestement pas possible de prévoir cette évolution, Le GIEC a dû envisager un certain nombre d'hypothèses alternatives, désignées comme scénarios. Décrits en 2000 dans un rapport spécial du GIEC [7], ces scénarios d'émissions (SRES 2000, SRES étant l'abréviation de *Special Report on Emission Scenarios*, Rapport spécial sur les scénarios d'émissions), au nombre de quarante, sont regroupés en quatre familles (A1, A2, B1 et B2), dites canevas, qui étudient différentes voies de développement en fonction d'un large éventail de facteurs démographiques, économiques et technologiques ainsi que des émissions de gaz à effet de serre qui en résultent. Seules les politiques climatiques actuelles sont prises en considération dans ces scénarios qui sont utilisés pour estimer les changements climatiques à venir.

Le canevas A1 fait l'hypothèse d'un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille de scénarios se répartit en trois groupes qui correspondent à différentes orientations de l'évolution technologique du point de vue des sources d'énergie : à forte composante fossile (A1FI), non fossile (A1T) et équilibrant les sources (A1B). Le canevas B1 décrit un monde convergent présentant les mêmes caractéristiques démographiques que A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information. Le canevas B2 décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissances démographique et

économique, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Le canevas A2 décrit un monde très hétérogène caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques. Aucun de ces scénarios ne s'est vu affecter un niveau de probabilité.

La poursuite des émissions de gaz à effet de serre au rythme actuel ou à un rythme plus élevé devrait accentuer le réchauffement et modifier profondément le système climatique au XXI^e siècle. Il est très probable que ces changements seront plus importants que ceux observés pendant le XX^e siècle (figure 8). Un réchauffement d'environ 0,2 °C par décennie

Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface

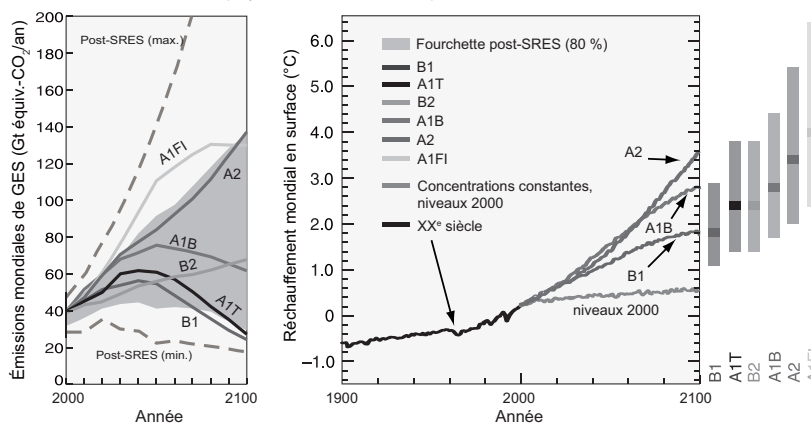


Figure 8. Scénarios du GIEC/IPCC pour le XXI^e siècle (extrait de [6]).

Le 4^e rapport du GIEC [6] ne fait que confirmer, à très peu près, les conclusions publiées dans son 3^e rapport, 6 ans auparavant, les meilleures estimations des élévations de température pour le XXI^e siècle donnant une fourchette allant de 1,8 °C à 4,0 °C.

À gauche : Émissions mondiales de gaz à effet de serre (en Gt équivalent CO₂) en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes continues) et intervalle au 80^e percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les gaz à effet de serre sont le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés.

À droite : Les courbes correspondent aux moyennes multimodèles du réchauffement en surface pour les scénarios A2, A1B et B1, en prolongement des simulations relatives au XX^e siècle. Ces projections intègrent les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe la plus basse ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable (zone plus claire) correspondant aux six scénarios de référence du SRES pour la période 2090-2099. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999.

au cours des vingt prochaines années est anticipé dans plusieurs scénarios d'émissions SRES (voir tableau 1). Même si les concentrations de l'ensemble des gaz à effet de serre et des aérosols seraient maintenues aux niveaux de 2000, l'élévation des températures se poursuivrait à raison de 0,1 °C environ par décennie.

Tableau 1. Projections des valeurs moyennes du réchauffement en surface et de l'élévation du niveau de la mer à la fin du XXI^e siècle, à l'échelle du globe d'après le GIEC [6]. Noter que les prévisions d'élévation du niveau de la mer sont faites sauf évolution dynamique rapide de l'écoulement glaciaire, aujourd'hui imprévisible, mais qui pourraient accélérer considérablement cette élévation.

Cas	Variation de température (°C, pour 2090-2099 par rapport à 1980-1999)		Élévation du niveau de la mer (m, pour 2090-2099 par rapport à 1980-1999)
	Valeur la plus probable	Intervalle probable	Intervalle basé sur les modèles
Concentrations constantes, niveaux 2000	0,6	0,3-0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
Scénario A1T	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
Scénario B2	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
Scénario A1B	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
Scénario A2	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

A l'échelle régionale, plusieurs types de changement sont prévisibles :

- un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord, et un réchauffement minimal au-dessus de l'océan Austral et d'une partie de l'Atlantique Nord ;
- une contraction de la couverture neigeuse, une augmentation d'épaisseur de la couche de dégel dans la plupart des régions à pergélisol et une diminution de l'étendue des glaces de mer, les eaux de l'Arctique pouvant être pratiquement libres de glace à la fin de l'été d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle ;

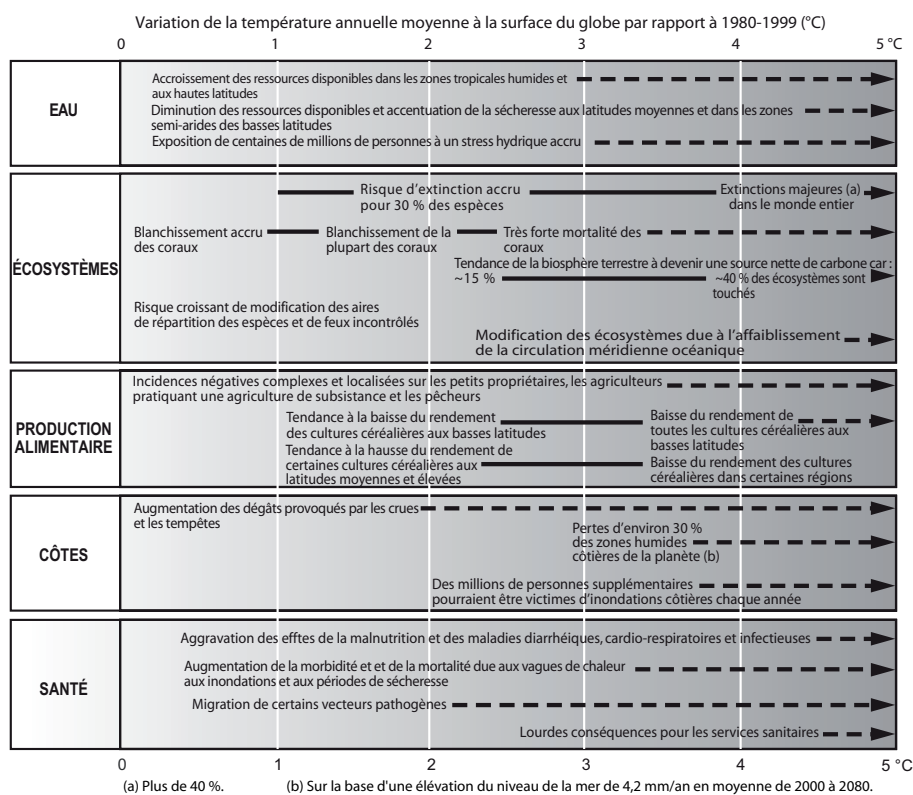
- une hausse très probable de la fréquence des températures extrêmement élevées, des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations ;
- une augmentation probable d'intensité des cyclones tropicaux ;
- une augmentation très probable des précipitations aux latitudes élevées et, au contraire, une diminution probable sur la plupart des terres émergées subtropicales ;
- une baisse des ressources en eau de zones semi-arides (bassin Méditerranéen, ouest des États-Unis, Afrique australe, nord-est du Brésil, etc.).

Il est probable que certains écosystèmes seront plus durement touchés que d'autres par l'évolution du climat (tableau 2) :

- pour les écosystèmes terrestres : toundra, forêt boréale et régions montagneuses, en raison de leur sensibilité au réchauffement ; écosystèmes de type méditerranéen, à cause de la diminution des précipitations ; forêts pluviales tropicales, dans les zones où la pluviosité diminue ;
- pour les écosystèmes côtiers : mangroves et marais salants, soumis à de multiples contraintes ;
- pour les écosystèmes marins : récifs coralliens, soumis à de multiples contraintes ; biome des glaces de mer, en raison de sa sensibilité au réchauffement.

Ainsi, il faut s'attendre à ce que les changements climatiques induits par les activités humaines aient des conséquences sensibles sur nos environnements et sur la biodiversité. Ces changements semblent inéluctables et d'autant plus marqués que l'on ne mettra pas en œuvre, ou pas suffisamment, des mesures limitant nos émissions de gaz à effet de serre. Du fait de leur impact inégal sur les différentes régions de la planète, l'adaptation à ces changements sera, en toute hypothèse, coûteuse et très pénalisante pour nombre de populations alors que, pour d'autres, les conséquences seront moins négatives ou même bénéfiques.

Tableau 2. Exemples d'incidences planétaires anticipées des changements climatiques (et, le cas échéant, de l'élévation du niveau de la mer et de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) selon l'ampleur de la hausse de la température moyenne à la surface du globe au XXI^e siècle. Les traits noirs relient les diverses incidences entre elles, les flèches en pointillé indiquent que ces incidences se poursuivent avec le réchauffement. La disposition du texte permet de voir approximativement à quel niveau de réchauffement s'amorce l'effet mentionné. Les chiffres relatifs à la pénurie d'eau et aux inondations représentent les répercussions supplémentaires des changements climatiques relativement aux conditions projetées selon les scénarios A1FI, A2, B1 et B2 du SRES. Ces estimations ne tiennent pas compte de l'adaptation aux changements climatiques. Toutes ces incidences sont affectées d'un degré de confiance élevé (Extrait de [6]).



Références

- [1] Bard, E. (2004) Greenhouse effect and ice ages: historical perspective. *C. R. Geosciences*, 336, p. 603-638. Voir aussi Foucault, A. (2007) A propos d'un bicentenaire : les débuts de la paléoclimatologie. *Sciences*, 2007 (3), p. 15-19. En ligne sur Internet : http://www.avancement-sciences.org/fichiers/2007_3_Foucault.pdf
- [2] Foucault, A. (2009) Climatologie et paléoclimatologie. 308 p. Dunod, Paris.

- [3] Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P. & Schrag, D. P. (1988) A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281 (5381), p. 1342-1346. Voir aussi le site internet <http://www.snowballearth.org/>
- [4] Penck, A. & Brückner, E. (1901-1909) Die Alpen im Eiszeitalter. T1, 1901 ; T2 et 3, 1909. Leipzig.
- [5] Milankovitch, M. (1920) Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Gauthier-Villars, Paris, 339 p., et (1941) Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eisenzeitenproblem. Acad. Royale serbe, Belgrade.
- [6] Pachauri, R.K & Reisinger, A. (eds.) (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*, Geneva, Switzerland, 104 p. (Tous les rapports du GIEC/IPCC sont accessibles sur le site internet www.ipcc.ch)
- [7] Nakicenovic, N. & Swart, R. (eds.) (2000) Special Report on Emissions Scenarios, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 612 p.

L'auteur : Alain Foucault est professeur émérite du Muséum national d'histoire naturelle (Paris).