Jean Poitou et Pascale Braconnot

edp sciences

Jean Poitou
et Pascale Braconnot

Le climat de la Terre se réchauffe, un réchauffement particulièrement marqué sur les cinq dernières décennies. Une vaste communauté scientifique s'est organisée à l'échelle mondiale pour percer les causes et les mécanismes de ce réchauffement afin de pouvoir anticiper l'avenir du climat et concevoir les moyens de le contenir et d'en maîtriser les conséquences. La société civile n'est pas en reste dans ses efforts pour inciter les décideurs à prendre les mesures appropriées pour que l'évolution du climat reste dans des limites gérables. Il en résulte une profusion de publications, tant dans les revues scientifiques que dans la grande presse et les divers médias.

Comme tout domaine spécialisé, les sciences du climat ont leur jargon propre, soit des termes spécifiques au domaine, soit des mots et expressions du langage courant mais avec des significations différentes. Ainsi, alors qu'en langage courant un puits est une source d'eau ou de pétrole, pour le climatologue, un puits de CO_2, c'est le milieu ou le processus qui enlève du CO_2 à l'atmosphère. Le jargon des climatologues est largement repris par les médias qui n'en explicitent pas systématiquement le sens.

Dans ce livre, le lecteur trouvera quelques quatre cents définitions de termes concernant le climat et son évolution, explications présentées avec le contexte d'utilisation de ces termes. Pour mieux situer les choses, dix-huit encadrés tout au long du livre détaillent des processus climatiques et des moyens mis en œuvre pour les étudier.

Jean Poitou et Pascale Braconnot sont tous deux chercheurs du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement à Gif-sur-Yvette. Après leur livre « Le Climat : la Terre et les hommes », une introduction à la connaissance du climat et de son évolution, rédigé avec Valérie Masson-Delmotte, ils ont à nouveau uni leurs compétences pour écrire ce livre.

ISBN : 978-2-7598-2545-5

9 782759 825455

edp sciences
www.edpsciences.org

Les mots du climat

Jean Poitou et Pascale Braconnot

edp sciences

Des mêmes auteurs

Le climat : la Terre et les Hommes, Jean Poitou, Pascale Braconnot et Valérie Masson-Delmotte, EDP Sciences, 2015, ISBN : 978-2-7598-0881-6

Remerciements

Nous tenons à remercier Valérie Masson-Delmotte pour l'aide précieuse qu'elle nous a apportée pour établir la liste des termes à définir dans cet ouvrage. Merci à notre éditeur qui nous a judicieusement incités à enrichir l'ouvrage au-delà d'un simple glossaire. Et nous remercions particulièrement Nada Caud pour sa relecture attentive du manuscrit.

Cet ouvrage a été financé par le projet JPI-Belmont PACMEDY (ANR-15-JCLI-0003-01).

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2545-5

DOI : 10.1051/978-2-7598-2545-5

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/fr/) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© Les auteurs, 2021

Table des matières

Avant-propos 7

Introduction 9

Le glossaire du climat 11

Encadrés

Les aérosols : des acteurs polyvalents du climat 13
Les glaces, témoins des climats anciens 24
Diversité des climats 30
L'action internationale, les COPs 38
La cryosphère, témoin et acteur du climat actuel 41
Le cycle de l'eau 44
Le carbone dans les enveloppes de la Terre 48
L'effet de serre : découverte et identification du rôle climatique 55
El Niño 62
Le GIEC 70
Le niveau des océans : mesure, évolutions 82
Les moussons 84
Pourquoi des mesures par satellite 88
Que nous apportent les paléoclimats ? 92

Reconstruction des paléoclimats : proxies et datations 95
Des fluctuations naturelles du climat : l'Optimum médiéval, le Petit Âge Glaciaire 100
Scénarios 108

Avant-propos

Le climat est en train d'évoluer. Les rapports publiés par le GIEC font de plus en plus état d'un réchauffement qui s'accélère. Les relevés météorologiques font de plus en plus fréquemment état d'épisodes exceptionnellement chauds ou de précipitations intenses dans diverses régions du globe. L'origine du réchauffement et ses conséquences possibles font l'objet d'études approfondies pour lesquelles une vaste communauté scientifique travaille d'arrache-pied pour comprendre comment fonctionne le climat et pour prévoir ce qu'il pourrait devenir dans l'avenir selon divers scénarios d'évolution de la société et de ses émissions de gaz à effet de serre.

La publicité faite par les médias aux travaux du GIEC et aux COP a amené une prise de conscience collective. Beaucoup, convaincus de l'urgence d'agir et navrés de la lenteur avec laquelle les États se lancent dans des actions, se regroupent et prônent divers types d'actions : effectuer une grande transition énergétique qui permettrait de réduire drastiquement les émissions de CO_2, capter et utiliser ou séquestrer le dioxyde de carbone produit par les activités humaines, limiter la consommation d'aliments dont la production ou la distribution sont fortement émettrices de CO_2, limiter aussi les déplacements, etc. Dans tout ce foisonnement de propositions se mélangent de bonnes et de moins bonnes idées. Le sujet est tellement vaste que nul ne peut en appréhender facilement toutes les facettes et qu'il faut pouvoir comprendre de nombreux sujets scientifiques ayant tous leurs références et leur propre jargon, etc.

Il y a aussi un certain nombre d'activistes, pour certains des spécialistes de haut niveau dans leur domaine qui n'est pas le climat, qui nient toute action de l'homme sur le climat et rejettent les projections faites concernant son évolution future. Face à ces polémiques, le profane a souvent du mal à comprendre réellement les propos des uns et des autres.

Comme pour tout domaine de recherche, la climatologie a son jargon, ses mots propres, ses expressions, qui existent parfois dans la langue courante mais avec un sens différent, et qui peuvent donc dérouter ceux qui s'emparent du sujet ou le novice dans ce domaine, et éventuellement conduire à une interprétation erronée de ce qui est lu ou entendu.

Le but de cet ouvrage est d'apporter au lecteur la définition de chaque terme spécialisé qu'il peut rencontrer dans un document, une présentation ou un débat sur le climat et son évolution. Quand cela s'avère nécessaire, la définition est assortie d'une courte explication.

Outre ce glossaire, un certain nombre d'encadrés offrent une vue encyclopédique de phénomènes, de processus, de moyens de mesure mis en œuvre, de résultats d'observations et de reconstruction des climats actuels et du passé.

Bien évidemment, cet ouvrage utilise des termes définis dans le glossaire. La première apparition de l'un de ces termes dans un texte ou dans une définition est soulignée pour informer le lecteur qu'il trouvera dans le glossaire la signification de ce terme.

Introduction

Climat, un mot dont le sens diffère selon que l'on se réfère à un climat régional ou au climat global. Le climat global se réfère essentiellement à un nombre restreint de paramètres météorologiques. Le climat régional est en relation directe avec l'environnement local : relief, hydrographie, écosystème… caractéristique d'un environnement donné.

Au cours des dernières décennies, le climat de la Terre s'est réchauffé : la température de la basse atmosphère s'élève, les mesures systématiques des réseaux météorologiques ne laissent aucun doute sur ce point. Peut-être dira-t-on que le réchauffement est faible, à peine plus d'un degré en moyenne globale. Mais il a déjà des conséquences bien visibles sur l'ensemble des paramètres météorologiques, sur la biosphère, sur la neige et la glace, et sur l'océan. Les espèces animales tentent de s'y adapter, souvent en migrant, ou disparaissent ; la végétation se déplace ; les glaciers fondent ; le niveau de la mer monte ; les canicules, les pluies intenses se font plus fréquentes. Ce réchauffement inquiète les spécialistes. Il faut savoir que les grandes glaciations qui ont recouvert tout le nord des continents européens et américains de plus de 3 500 m de glace entraînant une baisse de 120 m du niveau de la mer n'étaient en moyenne qu'à 4 à 5 degrés en dessous des températures actuelles.

Tout phénomène pouvant éventuellement être relié à l'altération locale ou globale du climat, fait l'objet d'une large couverture médiatique, de façon maintenant quasi quotidienne. Et comme beaucoup de sujets brûlants d'actualité, le climat, son évolution, font l'objet de polémiques dont certains médias et réseaux sociaux sont friands. À l'évidence, il importe que chacun comprenne ce qui est vraiment en train de se passer pour anticiper ce qui peut arriver et s'y préparer.

Comprendre, c'est comprendre les phénomènes et comprendre les spécialistes qui en parlent, savoir ce que veulent dire les mots, les expressions qu'ils emploient, et qui n'ont pas toujours la même signification que dans la langue courante. Toute personne qui désire comprendre ce qui se passe, a besoin de savoir ce que les mots et expressions utilisés recouvrent réellement. C'est l'objet de ce livre, donner à chacun, quel que soit son niveau de connaissances, la signification de près de 400 termes qu'il rencontre dans tout ce qu'il lit ou entend sur le climat, avec des explications sur les observations ou les processus auxquels ces termes se rapportent. Outre la définition simple, quelques explications aident à comprendre ce que ces termes recouvrent dans les manifestations du climat. Ceci, c'est l'objet premier de ce livre, un glossaire du climat.

Mais il nous a aussi paru nécessaire de donner au lecteur une vision plus encyclopédique sur un certain nombre de processus climatiques, sur la façon dont les spécialistes arrivent à les élucider, ou sur le rôle que joue un organisme comme le GIEC dans l'étude du climat et de son évolution, et ses projections sur un futur qui dépendra de ce que nous ferons.

Le glossaire du climat

2 °C

Valeur limite pour le réchauffement en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle intervenant dans les négociations internationales, adoptée en 2009 par la conférence de Copenhague.

Cette valeur n'a rien de magique ; on suppose seulement qu'à cette valeur limite, on n'aura pas atteint de seuil critique, mais on ne sait pas précisément où se situent les seuils critiques.

absorption

Capture d'une substance ou du rayonnement par un réservoir.

La photosynthèse est un des processus d'absorption du CO_2 par la biomasse.

absorption du CO_2 par les minéraux

Voir cycle du carbone.

acidification

Diminution du pH.

L'océan s'acidifie du fait de l'absorption du CO_2. Certains carbonates des coquilles, exosquelettes… d'animaux marins deviennent solubles dans l'eau de mer.

action du Soleil

Le Soleil agit sur le climat de diverses façons :

– il fournit son énergie à la machine climatique. Les variations d'activité du Soleil modulent (faiblement) le flux d'énergie arrivant sur Terre et, de là, la température ;

– il active des réactions chimiques dans l'atmosphère. Les radicaux, agents de la production ou de la disparition de certaines espèces chimiques réactives, se forment sous l'action du rayonnement UV solaire.

adaptation

Ajustement d'un système à une modification de son environnement.

Face au changement climatique, la biosphère tend à migrer pour conserver l'habitat qui lui convient. L'homme doit s'adapter au changement climatique et à ses effets néfastes ou tirer profit de ses effets bénéfiques. C'est un enjeu de société : il faut anticiper les besoins d'adaptation.

advection

Apport, par le mouvement horizontal des fluides (atmosphère, eau), de certaines de leurs propriétés : chaleur, salinité, corps dissout ou en suspension…

aérosol

Particules en suspension dans l'atmosphère. Leur taille va de quelques nanomètres à la centaine de micromètres.

Voir l'encadré « **Les aérosols : des acteurs polyvalents du climat** ».

aérosol absorbant

Aérosol composé de particules qui absorbent le rayonnement solaire ou le rayonnement infrarouge thermique.

Les aérosols de suie, produits par les feux de biomasse (savane, forêt) ou la combustion de combustibles fossiles (par exemple fumées d'usines, moteurs diesel) sont des aérosols absorbants.

Voir aussi effets direct, semi-direct et indirect des aérosols et suie/noir de carbone.

aérosol terrigène

Aérosol minéral soulevé par le vent. Exemples : les aérosols de poussière provenant du Sahara, le « bol de poussière » des années 1930 dans les grandes plaines américaines. Les aérosols terrigènes apportent certains éléments nécessaires au phytoplancton dans les grands bassins océaniques.

aérosol volcanique

Aérosol formé à partir des particules éjectées dans l'atmosphère par les éruptions volcaniques.

Lors des éruptions majeures, les volcans injectent dans la stratosphère du soufre qui va se transformer en particules de sulfates.

Voir volcanisme (action sur le climat).

afforestation

Plantation de forêt sur des surfaces initialement non boisées.

Les aérosols : des acteurs polyvalents du climat

Un aérosol est constitué de particules en suspension dans l'air. Un aérosol peut être d'origine naturelle, ou dû à l'action de l'homme. Un premier processus de formation des aérosols est directement lié à l'émission de matières sous forme de particules. C'est le cas par exemple des poussières désertiques. D'autres se forment dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs via des réactions chimiques induites par l'action oxydante de l'atmosphère et l'humidité ambiante. C'est ainsi que les composés chimiques émis par le plancton se transforment en particules de sulfates. Les aérosols évoluent chimiquement dans le temps et ils participent, via leur capacité à réfléchir ou absorber les rayonnements solaire et infrarouge, au bilan énergétique de la Terre. Les aérosols les plus nombreux dans l'atmosphère sont les aérosols inorganiques (comme les sulfates, nitrates, ammoniac, ou sels de mer), les aérosols organiques, le carbone suie, les aérosols minéraux et les composés biologiques.

Parmi les aérosols naturels, on peut citer les cendres projetées par les éruptions volcaniques, les aérosols terrigènes, qui sont de la poussière soulevée du sol et emportée par les vents, les aérosols des feux de forêt et des feux de savane allumés par la foudre, les aérosols de sulfate formés à partir de composés volatils émis par le plancton.

Les aérosols d'origine humaine sont le plus souvent produits par des feux : feux de forêt, feux de défrichement ou d'écobuage, ou feux pour le chauffage ou pour la cuisine, cheminées industrielles. Les pratiques agricoles peuvent aussi générer des aérosols : à partir des émanations d'ammoniac, ou des aérosols terrigènes soulevés sur des labours (comme le bol de poussière dans les années 1930 dans les grandes plaines des États-Unis). Actuellement, la majorité du carbone suie, des sulfates, du nitrate et de l'ammoniac sont d'origine anthropique.

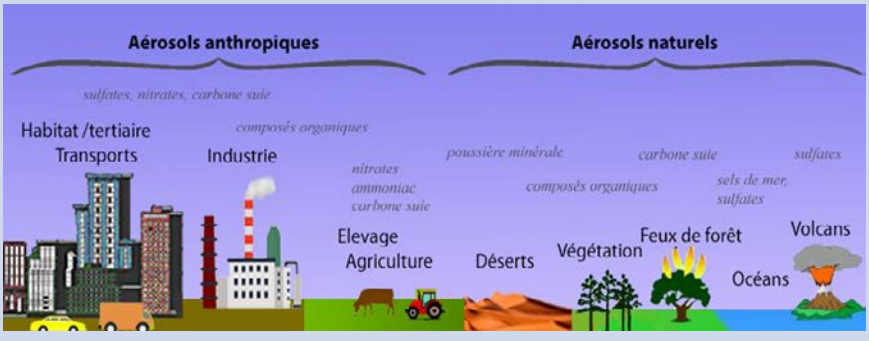


Figure 1-1. Les sources des aérosols.

Les aérosols peuvent être transportés par le vent à des milliers de kilomètres de leur région d'émission. Ainsi, les aérosols de poussières provenant du Sahara peuvent se retrouver dans les glaces polaires de l'hémisphère nord. Elles sont également transportées jusqu'en Amazonie où elles constituent la principale source de phosphates pour la végétation.

Les aérosols restent dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'ils retombent au sol, soit par gravité, soit par lessivage par la pluie.

Les aérosols et le climat

Les aérosols jouent plusieurs rôles dans le climat, selon leur nature, leur localisation (figure 1-1). Les aérosols volcaniques qui atteignent la stratosphère y séjournent pendant deux ou trois ans. Réfléchissant une partie du rayonnement solaire incident, ils font baisser la température à la surface du globe. Ainsi l'éruption du Pinatubo en 1991 a provoqué un refroidissement de la température globale de ½ degré pendant deux ans. Même des éruptions moins violentes que celle du Pinatubo contribuent à refroidir le climat. Les aérosols provenant d'une série d'éruptions volcaniques ont apporté une contribution majeure au déclenchement du Petit Âge glaciaire qui a provoqué une baisse des températures du XVI^{e} siècle au milieu du XIX^{e} siècle. Le rôle d'écran joue évidemment aussi avec le rayonnement infrarouge.

Outre leur rôle direct d'écran, les aérosols ont aussi une action indirecte importante sur le climat par l'intermédiaire des nuages. La vapeur d'eau a besoin de particules pour se condenser et former les nuages. Ce sont des particules d'aérosols, en particulier les particules de sulfate provenant des émanations du plancton, qui jouent ce rôle de noyaux de condensation. Si ces noyaux de condensation sont en grand nombre, les gouttelettes des nuages d'eau liquide sont plus nombreuses et plus fines. Le nuage en devient plus réfléchissant. En outre, les gouttes ne tombent qu'une fois suffisamment grossies par coalescence avec d'autres gouttelettes. Les gouttelettes très fines mettront plus de temps à atteindre une taille telle que leur poids dépasse la résistance que l'air oppose à leur chute. Créé par un aérosol dense, le nuage sera donc plus réfléchissant et séjournera plus longtemps dans le ciel, ce qui accentue son effet refroidissant.

Mais certains aérosols, en particulier ceux issus de combustion de biomasse ou de charbon, absorbent le rayonnement, créant un réchauffement local de l'atmosphère. Un tel réchauffement entraîne à son tour une perturbation de la stabilité verticale de l'atmosphère.

Globalement, les aérosols combinent donc des effets réchauffants et des effets refroidissants. La résultante de ces deux effets est une action refroidissante, donc en sens inverse de l'effet de serre. Ainsi, les températures fraîches des années 1950 sont dues aux aérosols provenant de l'intense utilisation du charbon comme combustible à cette époque. Au cours des dernières décennies, les aérosols ont

aussi contribué à limiter le réchauffement sur l'Europe, bien que les dépôts de carbone suie sur la banquise ou sur la neige réduisent la réflectivité de la surface et en amplifient la fonte. Doit-on se réjouir de ce que la pollution qui affecte la qualité de l'air limite le réchauffement ?

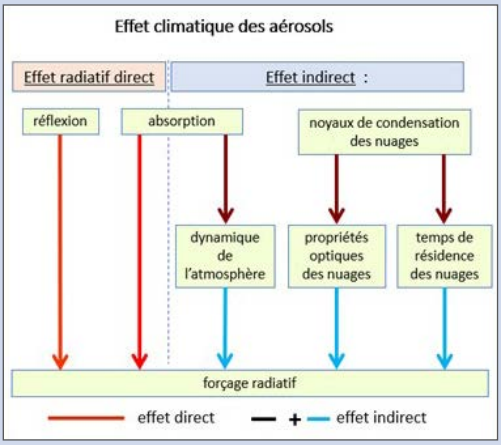


Figure 1-2. Les aérosols agissent sur le rayonnement, soit directement par leur réflexion ou leur absorption, soit indirectement par des effets thermodynamiques ou via la formation des nuages.

aile de papillon/Lorenz

Voir système chaotique.

ajustement des modèles

Réglage des paramètres de façon à obtenir un bilan radiatif équilibré avec un équilibre climatique correspondant à ce que l'on connaît du climat terrestre. Ce travail exige des simulations longues du fait des temps caractéristiques d'équilibrage des diverses composantes en jeu. L'ajustement ne cherche pas directement à améliorer l'accord aux observations ou à régler la réponse du modèle à une augmentation de l'effet de serre.

Voir aussi validation.

albédo

Pouvoir réflecteur d'une surface, fraction de la lumière incidente qui est réfléchie. L'albédo moyen de la Terre est de 30 %.

alcalinité

L'alcalinité d'une solution est une mesure de la quantité d'acide qu'il faut ajouter à cette solution pour l'amener à un pH de référence. Une eau basique est d'autant plus alcaline qu'il faut lui ajouter beaucoup d'acide pour la neutraliser.

aléa climatique

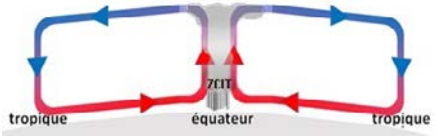
Événement susceptible de se produire et d'apporter des nuisances aux populations, aux activités ou à l'environnement. Ce peut être des événements extrêmes ou des évolutions à plus ou moins long terme liées au climat.

alizés

Vents entre les tropiques et l'équateur, de nord-est dans l'hémisphère nord, de sud-est dans l'hémisphère sud.

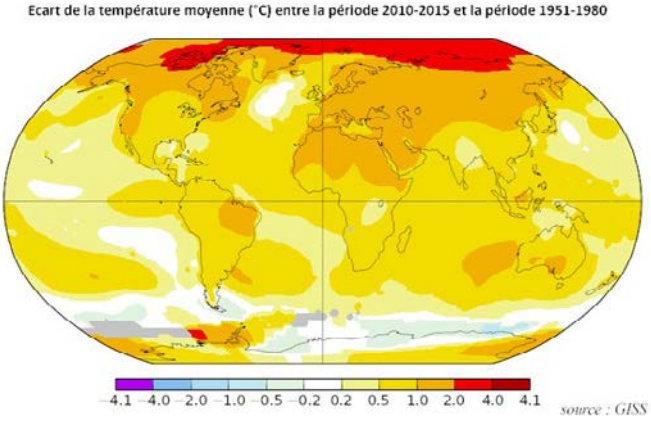
Au niveau de l'équateur, l'air chaud chargé d'humidité lors du passage au-dessus des océans, s'élève par ascendance convective ; la condensation de la vapeur d'eau réchauffe l'atmosphère, renforce le mouvement ascendant et produit des pluies intenses. L'air s'assèche en montant jusqu'à la tropopause vers 12 000 m. Il diverge de chaque côté de l'équateur en direction des pôles. Vers 30° de latitude, il redescend vers la surface générant des hautes pressions et provoquant la présence des grands déserts. L'air de ces zones est aspiré vers l'équateur par l'ascendance convective, et dévié vers l'ouest par la force de Coriolis. Au-dessus de l'océan, il se charge d'humidité qui, avec la chaleur intense venant du Soleil à l'équateur, va causer l'ascendance convective décrite ci-dessus.

Voir aussi circulation atmosphérique.



amplification polaire

Réchauffement exacerbé aux hautes latitudes, provenant de la structure de la couche limite atmosphérique et de la réduction des surfaces enneigées ou englacées qui y diminue l'albédo, renforçant le réchauffement par rétroaction. D'autres phénomènes peuvent y contribuer comme un accroissement de l'humidité atmosphérique ou des modifications de la couverture nuageuse.



analyse spectrale

Méthodes utilisées pour mettre en évidence les composantes temporelles ou spatiales périodiques dans une courbe.

C'est par l'analyse spectrale des caractéristiques des foraminifères dans des carottes de sédiments marins qu'a été confirmée en 1976 la pertinence de la théorie astronomique des glaciations de Milankovitch.

La transformation de Fourier est fréquemment utilisée en analyse spectrale.

anomalie

Écart par rapport à une valeur de référence, qui est la moyenne sur une période longue (le plus souvent 20 ou 30 ans).

Les séries de mesures font appel à plusieurs instruments successifs, ce qui nécessite leur intercalibration qui garantit une bonne homogénéisation des mesures. Même s'il peut subsister un biais sur la mesure absolue, les variations au cours du temps sont bien mesurées par l'anomalie.

anthropique

Dû à l'action de l'homme.

anthropocène

Nom donné par Paul Crutzen à l'ère géologique actuelle où l'évolution de la Terre est impactée par l'action de l'homme. Si la réalité de l'anthropocène n'est pas contestée, la date du début de cette ère est l'objet de controverses au sein de la communauté scientifique.

anticyclone

Zone caractérisée par un maximum des pressions atmosphériques. Les vents tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones dans l'hémisphère nord et inversement dans l'hémisphère sud. La zone de basses pressions est appelée cyclone.

approximation hydrostatique

Approximation que la pression atmosphérique en un point donné est égale au poids de la colonne atmosphérique au-dessus de ce point.

aquifère

Couche de roche perméable contenant de l'eau.

AR1, AR2, AR3…

AR est l'abréviation de *Assessment Report* (rapport d'évaluation). Les AR1, AR2… sont les rapports publiés par le GIEC pour faire périodiquement le point des connaissances sur le réchauffement climatique.

Voir GIEC.

archives climatiques

Éléments ayant enregistré et conservé des caractéristiques témoins du climat qui régnait au moment de leur formation.

Carottes de sédiments ou de glace, coraux, restes de pollens, cernes d'arbres, spéléothèmes, moraines, lœss, données historiques, constituent des archives climatiques.

aridification

Changement graduel ou brutal du climat local conduisant à l'aridité de la région.

aridité

Caractérise une région où la pluviométrie est inférieure à l'évapotranspiration possible dans cette région.

Aristote

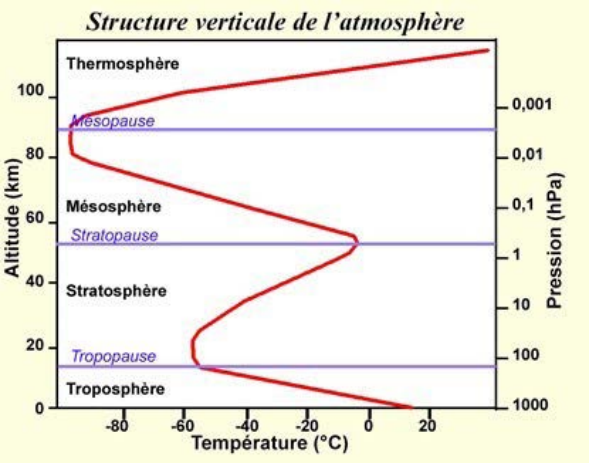
Aristote (–384 - –322) : philosophe grec qui a abordé tous les domaines des connaissances de l'époque, dont le climat (dans les *Météorologiques*).

Arrhenius

Svante August Arrhenius (1859-1927) : chimiste suédois, Prix Nobel de chimie en 1903. En 1896, pour expliquer les glaciations, il a calculé de façon empirique l'impact sur la température d'une variation de la concentration atmosphérique du CO_2 compatible avec les processus naturels. Ses résultats sont comparables à ceux de nos modèles climatiques actuels. Il prévoyait que l'utilisation du charbon provoquerait un réchauffement de la température, qu'il pensait favorable au développement de l'humanité.

atmosphère

Enveloppe de gaz maintenue par gravité autour de la Terre.



Elle s'étend sur environ 1 000 km, sans limite nette. Elle se divise en plusieurs couches (voir figure) dont les limites en altitude varient selon la latitude et les saisons. La majeure partie des phénomènes intéressant le climat se produisent dans la troposphère, la couche inférieure, siège de mouvements convectifs. La seconde couche, stratifiée, la stratosphère, influence aussi le climat par les variations de sa couche d'ozone et par les nuages qui s'y forment.

atténuation

Actions pour limiter le réchauffement climatique en réduisant l'effet de serre ou le flux d'énergie solaire absorbé par la Terre.

L'abandon des combustibles fossiles est un moyen de réduire fortement les émissions de CO_2. Le captage et le stockage du CO_2 produit en est un autre. La reforestation est une voie pour capturer une partie du CO_2 qui se trouve dans l'atmosphère. La géoingénierie propose d'autres voies. Toutes ces solutions potentielles doivent être étudiées au cas par cas pour bien cerner tous leurs effets potentiellement indésirables.

attribution

Détermination des contributions relatives des divers facteurs possibles à un phénomène climatique observé (par exemple, le rôle du CO_2 dans le changement climatique actuel).

L'attribution repose sur des méthodes statistiques et sur la compréhension, avec l'aide de simulations climatiques longues, de la façon dont le système répond aux perturbations, ceci afin d'apprécier la variabilité naturelle et d'estimer les signatures des réponses du système aux différents forçages.

bandes d'absorption

Une molécule passe dans un état excité en absorbant un photon dont l'énergie est précisément celle de l'excitation. Le spectre d'absorption présente donc une raie à cette énergie. Mais la molécule présente des ensembles de niveaux d'excitation très voisins. De plus, les raies sont élargies par l'effet Doppler dû au mouvement des molécules. Ce sont donc des bandes d'absorption que l'on observe généralement dans le spectre.

banquise

Voir glace de mer.

bascule

Évolution du climat en opposition de phase entre deux points de la Terre.

Dans les glaciations, on observe des phénomènes de bascule inter-hémisphérique liée à une modification de la circulation méridienne de l'océan Atlantique.

bassin-versant

Zone continentale où toutes les eaux convergent vers la même sortie : cours d'eau, lac, mer, océan.

Le bassin-versant est limité par des lignes de partage des eaux.

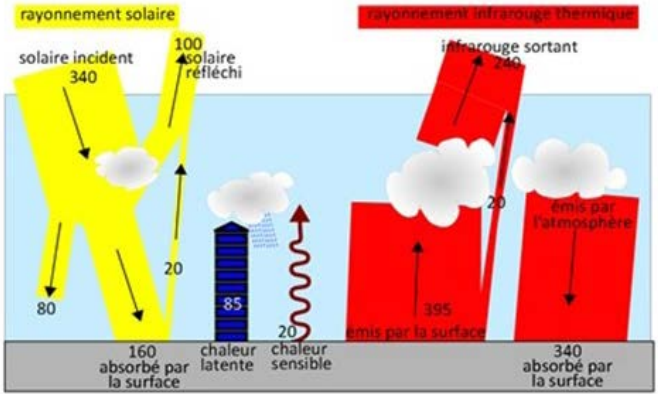
bilan mondial

(en anglais *Global Stocktake*) : se réfère à l'article 14 de l'Accord de Paris. Cet article stipule que la conférence des parties doit produire périodiquement un bilan mondial pour évaluer les progrès collectifs vers la réalisation de l'objectif de l'Accord, et pour informer les parties des actions individuelles. Le premier bilan mondial aura lieu en 2023 et, ensuite, de façon récurrente tous les cinq ans.

bilan radiatif

Bilan des échanges d'énergie entre la Terre et l'espace.

La Terre reçoit de l'énergie rayonnée par le Soleil et en renvoie dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. Les échanges d'énergie sont nombreux au sein des enveloppes fluides de la Terre. La figure montre les échanges d'énergie (en W/m^2) entre la Terre et l'espace et au sein de l'atmosphère.



Voir aussi équilibre radiatif.

biodiversité

Variété et diversité de l'ensemble de ce qui vit sur un espace donné.

biomasse

En écologie : masse totale des organismes vivants présents dans une région aux conditions environnementales spécifiques homogènes.

Pour les énergies : ensemble des matières organiques d'origine vivante à visée énergétique (par exemple le bois).

biome

Vaste communauté d'animaux et de végétaux, adaptée à des conditions environnementales spécifiques.

biosphère

L'ensemble comprenant les écosystèmes et organismes vivants sur la Terre (continents, atmosphère et océan) et leurs déchets et débris organiques.

blanchiment du corail

Décoloration du corail due à la perte des algues colorées vivant en symbiose dans les tissus du polype.

Le blanchiment actuel résulte du stress provoqué par une hausse des températures océaniques au-delà de 30 °C. Il entraîne fréquemment la mort de l'animal.

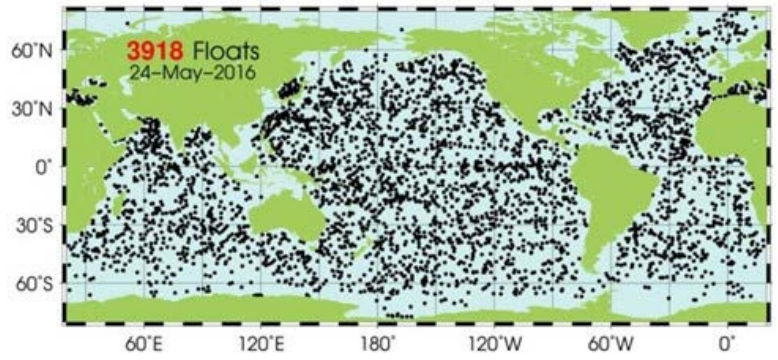
blocage

Situation météorologique pour laquelle un système de haute pression se déplace très lentement dans les moyennes et hautes latitudes et bloque les vents d'ouest dominants, ainsi que la progression vers l'est des systèmes dépressionnaires. Les situations de blocage sont associées à des situations extrêmes comme les vagues de froid en hiver ou les vagues de chaleur en été pouvant s'installer sur plusieurs jours.

Voir aussi oscillation.

bouées Argo

Système de plus de 3 000 bouées dérivantes et plongeantes qui fournissent, d'une part les profils verticaux de température et de salinité de l'océan jusqu'à 2 000 m de profondeur, et d'autre part les courants, par l'enregistrement de leurs déplacements.



Position des bouées au cours des 30 jours précédant la date indiquée.

budget carbone disponible

Quantité totale de CO_2 pouvant être émise dans l'atmosphère par les activités humaines tout en gardant le réchauffement global sous un seuil prédéfini. Cette définition tient compte du fait qu'il y a un lien fort entre les émissions cumulées de CO_2 et le réchauffement climatique. Elle permet, en prenant comme référence l'année 2018, d'estimer pour les objectifs de l'Accord de Paris, ce qu'il est encore possible d'émettre jusqu'au moment où les sources et les puits de carbone anthropiques seront égaux (neutralité carbone) pour maintenir le réchauffement de la température globale en dessous de 2 °C.

calotte de glace

Masse de glace en forme de dôme s'écoulant dans diverses directions et ne couvrant pas plus de 50 000 km^2.

Bien qu'on parle souvent de calottes polaires pour la glace qui recouvre le Groenland et l'Antarctique, le terme exact du fait de leur grande superficie est inlandsis.

canicule

Vague de chaleur anormalement forte pendant plusieurs jours et nuits successifs.

En France, on parle de canicule quand la température diurne excède 33 °C et la température nocturne 20 °C pendant au moins 3 jours de suite.

canopée

Étage supérieur de la forêt, qui reçoit directement le maximum de rayonnement solaire.

La canopée est un lieu privilégié d'interactions entre la forêt et l'atmosphère (par exemple rugosité pour les vents).

capacité oxydante de l'atmosphère

Capacité de l'atmosphère à oxyder les éléments chimiques qui s'y trouvent (H, C, N…).

L'oxydant majeur de l'atmosphère est le radical OH (noté aussi HO). Certains polluants, tel le monoxyde de carbone (CO), consomment le OH et réduisent ainsi la capacité oxydante de l'atmosphère.

carotte de glace

Cylindre de glace extrait segment par segment d'un glacier polaire ou alpin…

Les carottes de glace sont des archives climatiques irremplaçables : outre les indications sur les paléotempératures (voir thermomètre isotopique), elles renferment des bulles des paléoatmosphères et contiennent de nombreux autres indicateurs des climats passés apportés par les vents. Pour extraire la glace jusqu'au socle rocheux (3 500 m de profondeur dans l'Antarctique), il faut plusieurs années de forage.

Voir l'encadré « **Les glaces, témoins des climats anciens** ».

carotte de sédiment

Cylindre de sédiment pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de long, extrait verticalement du fond de l'océan ou d'un lac.

Les sédiments ont enregistré des traces des paléoclimats. C'est grâce aux carottes de sédiments marins qu'a été validée la théorie de Milankovitch des glaciations.

Voir archives climatiques.

carottier

Appareillage utilisé pour prélever un échantillon cylindrique d'un milieu naturel solide.

Les paléoclimatologues utilisent des carottiers pour prélever la glace dans les calottes et les glaciers, les sédiments au fond des océans et les surfaces continentales ou lacustres.

cellule de Ferrel ; cellule de Hadley ; cellule polaire

Voir circulation atmosphérique.

CFC / chloro-fluoro-carbure

Carbure organique dont la molécule contient du chlore et du fluor.

Les CFC sont très stables et peuvent donc migrer dans l'atmosphère jusqu'à la stratosphère où, quand les conditions s'y prêtent, ils détruisent les molécules d'ozone (voir trou d'ozone et protocole de Montréal).

chaleur latente

Chaleur transportée par un corps qui la restituera en changeant de phase.

La vapeur d'eau transporte de la chaleur latente qu'elle transformera en chaleur sensible en se condensant.

chaleur sensible

Chaleur transmise par conduction.

Un apport de chaleur sensible se traduit toujours par une augmentation de la température du corps qui la reçoit.

changement climatique

Modification durable du climat.

Il faut une observation sur plusieurs décennies pour avoir la certitude qu'on a bien un changement climatique et non une oscillation due à la variabilité propre du climat.

Les glaces, témoins des climats anciens

Dans les zones très froides, très haute montagne, régions polaires, la neige qui s'accumule au cours du temps ne fond pas et, sous son poids, se transforme en glace. Cette glace recèle de nombreuses informations sur les conditions environnementales de l'époque où elle s'est formée. En faisant des forages pour aller chercher la glace de la surface jusqu'au socle rocheux, on peut accéder à ces informations. Ces fameuses carottes de glace permettent ainsi de remonter dans le temps. La longueur de l'enregistrement dépend de l'épaisseur de la glace et du taux d'accumulation. L'épaisseur maximale est de l'ordre de 3 500 m, car au-delà la glace flue sous l'effet de la pression. Pour remonter à des époques très anciennes, il faut donc que l'accumulation annuelle de neige soit très faible au lieu considéré. Ainsi, les sites de carottages au Groenland où les précipitations de neige sont abondantes, ne permettent de remonter qu'environ 125 000 ans en arrière, alors qu'en Antarctique, des zones à faible enneigement ont permis d'atteindre 800 000 ans.

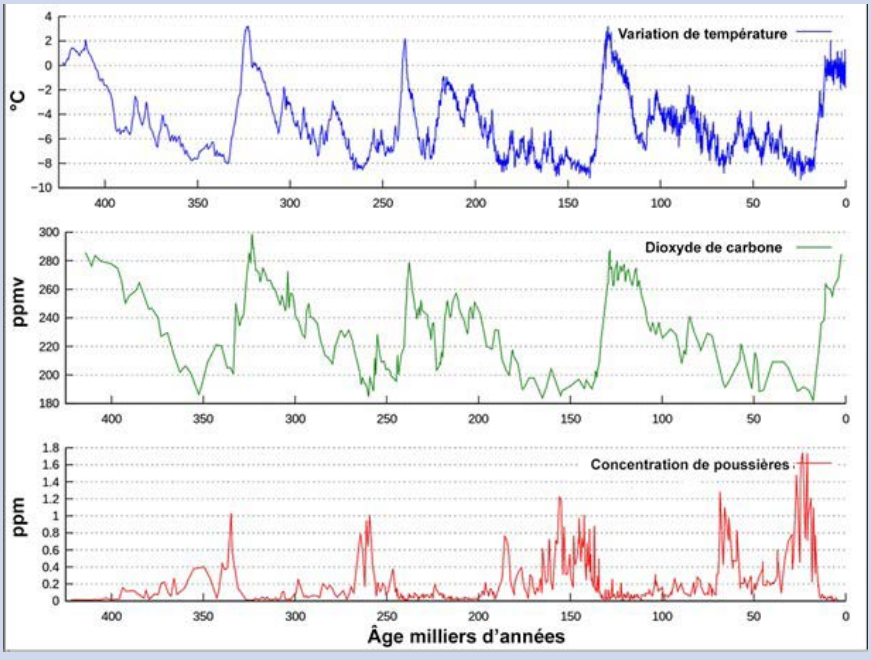


Figure 2-1. Le forage de Vostok a permis la première mise en évidence de la corrélation entre la concentration atmosphérique du CO_2 et la température pendant les glaciations. Les aérosols de poussière ont aussi laissé des dépôts, maximaux aux températures les plus froides, quand la mer était à son niveau le plus bas exposant aux vents de larges plaines, parties alors émergées du plateau continental.

La température qui régnait lors de la formation de la neige se reflète dans les proportions relatives des isotopes d'oxygène 18 et d'oxygène 16 de l'eau constitutive de la glace. Ceci est dû au fait que la proportion relative de ces deux isotopes de l'eau varie lors du parcours de la vapeur d'eau entre le lieu d'évaporation (sur l'océan) et le lieu de précipitation. Les condensations et ré-évaporations partielles appauvrissent la vapeur en oxygène 18, qui est l'isotope stable d'oxygène le plus lourd de l'eau. Ce phénomène de « distillation atmosphérique » a pu être calibré en observant ce qui se passe actuellement tant sur le Groenland que sur l'Antarctique. L'abondance relative de ces deux isotopes de l'eau constitue ainsi un précieux indicateur de la température.

Mais la neige n'est pas seule à se déposer sur les régions polaires. Les vents y apportent des poussières pouvant provenir de régions très éloignées, et qui sont des témoins des situations environnementales (climat) ou d'événements géologiques (éruptions volcaniques majeures, retournement du champ magnétique terrestre), qui aideront à dater la glace.

Les cristaux de neige ont emprisonné de l'air qui se retrouve sous forme de fines bulles dans la glace. L'analyse de cet air nous donne un accès direct à la composition de l'atmosphère à l'époque où la neige s'est transformée en glace. Ce sont des données extrêmement précieuses et les seuls témoins que nous ayons permettant de comparer l'évolution actuelle des gaz à effet de serre dans l'atmosphère avec leur concentration dans les époques pas ou très peu affectées par les émissions d'origine anthropique.

L'une des difficultés dans l'utilisation des carottes de glace pour reconstituer les climats du passé est de dater la glace qu'on analyse et de s'assurer que les mesures sont bien calées en temps entre les hautes latitudes nord et sud. Les propriétés optiques différentes des cristaux de glace d'hiver et d'été permettent d'identifier les couches saisonnières là où la neige tombe en abondance. On peut alors compter les années comme on compte les cernes dans le bois des arbres. Ces comptages sont hélas réservés aux couches les plus proches de la surface. Le tassement ne permet pas une telle résolution plus en profondeur. Des événements géologiques comme les éruptions volcaniques intenses sont identifiables par les cendres que le vent a transportées jusqu'aux pôles et qui se sont déposées sur la neige. Les poussières apportées contiennent des particules ferromagnétiques qui enregistrent dans la glace les inversions de champ magnétique terrestre. Une autre source pour la chronologie sont les isotopes cosmogéniques. Mais ces diverses sources ne suffisent pas partout et pour tout âge. Il faut donc aussi faire appel à des modèles d'évolution et d'écoulement de la glace. Le tout aboutit à une incertitude d'environ 300 ans pour les centaines de milliers d'années avant le présent.

Cette évaluation des climats du passé se fait avec toute glace pérenne : calottes polaires, très hautes montagnes (Andes…).

changement climatique inéluctable

En anglais : *climate change commitment*. Partie du réchauffement climatique à venir qu'il sera impossible d'éviter : elle est liée à l'inertie des systèmes géophysiques et socio-économiques. L'estimation de ce changement est généralement effectuée sous forme de changement de température additionnel ou de bilan de carbone.

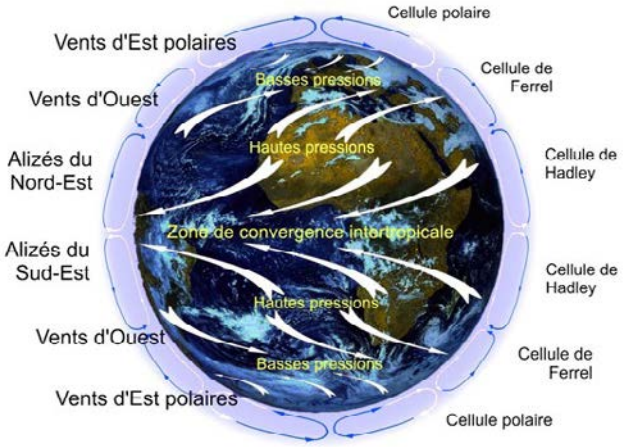
Charney

Jule Gregory Charney (1917-1981). Météorologiste américain, « père de la météorologie dynamique moderne ». L'évaluation de la sensibilité climatique du CO_2, donnée dans le « rapport Charney » dès 1978, a été confirmée par les rapports successifs du GIEC.

circulation atmosphérique

Ensemble des mouvements à grande échelle de l'atmosphère autour de la surface du globe. Ces mouvements liés aux écarts de température et de pressions associés entre les différentes régions, transportent de la chaleur des zones chaudes vers les zones froides. L'autre fluide qui assure le transport de chaleur est l'océan (voir circulation océanique).

La figure montre la structure générale de la circulation atmosphérique.



circulation de Walker

Boucle de circulation atmosphérique au-dessus de l'océan Pacifique intertropical. Les alizés qui convergent à l'équateur en soufflant d'est en ouest, poussent les masses d'eaux chaudes vers l'ouest du bassin où se forme la « piscine d'eau chaude » (*warm pool* en anglais). L'accumulation d'eau chaude provoque une forte évaporation à l'origine d'une importante activité convective accompagnée de fortes précipitations. Les vents d'altitude ramènent à l'est du bassin un air

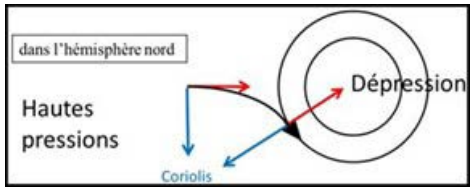
asséché, qui va redescendre en rayonnant et se refroidissant en direction du sol (phénomène de subsidence).

circulation générale

Ensemble des mouvements à très grande échelle des deux fluides, atmosphère et océan, de l'enveloppe terrestre. Ces deux milieux sont couplés par des échanges d'énergie, de quantité de mouvement et de matière.

circulation géostrophique

L'air se déplace sous l'action de deux forces : les gradients de pression et les forces de Coriolis qui dévient les mouvements vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Ainsi, dans l'hémisphère nord, les vents tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour des dépressions.



circulation méridienne

Circulation le long des méridiens (nord-sud ou sud-nord).

circulation océanique

Ensemble des courants marins. Par eux, l'océan transporte la chaleur à la surface du globe. On distingue deux types de courants : les courants de surface dont les moteurs sont les vents, et les courants profonds dont le moteur est le gradient de densité au sein du liquide. Les caractéristiques des courants sont aussi conditionnées par la force de Coriolis et par les continents sur lesquels ils butent.

circulation thermohaline

Circulation profonde de l'océan, dont le moteur, la densité, dépend de la température (« thermo ») et de la salinité (« haline ») de l'eau. Cette circulation prend naissance dans les hautes latitudes de l'Atlantique nord, et au voisinage de l'Antarctique dans l'hémisphère sud. Dans l'Atlantique nord, les eaux chaudes et salées du Gulf Stream montant vers le nord par la dérive nord-atlantique, se refroidissent au cours de leur trajet et évaporent de leur eau, accroissant leur salinité. Leur densité augmente donc. Dans le Grand Nord en hiver, l'eau gèle pour former de la glace de mer (banquise) en expulsant une partie de son sel. L'eau devenue très dense plonge jusqu'au fond de l'océan où elle va parcourir un long périple allant vers le sud jusqu'à l'Antarctique dont elle va faire plusieurs fois le tour avant de remonter lentement se mélanger dans les eaux des océans Indien et Pacifique, pour être reprise par les courants de surface qui la ramèneront un

jour dans le Grand Nord de l'Atlantique après un périple de 500 à 1 000 ans. Cette gigantesque boucle est appelée tapis roulant de la circulation océanique.

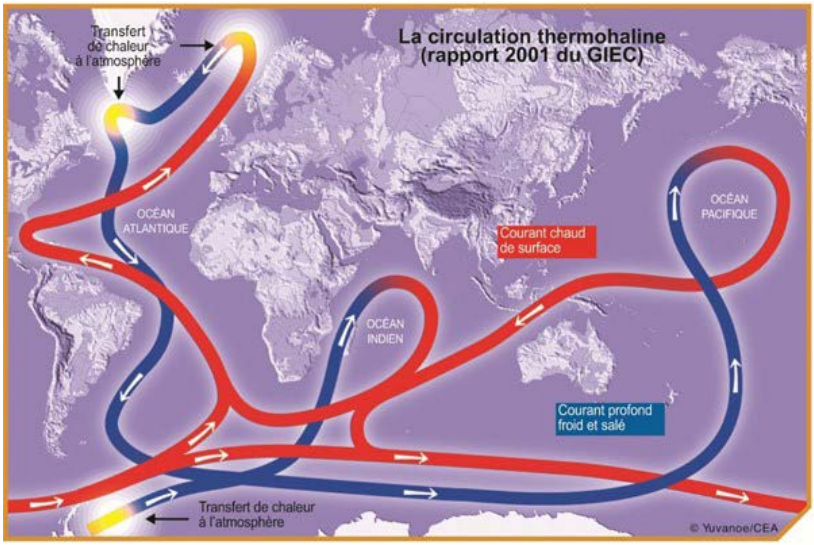


Schéma du « tapis roulant » de la circulation océanique. En bleu, la circulation profonde d'eau froide ; en rouge, la circulation de surface d'eau chaude. Dans les zones de plongée, l'océan apporte de la chaleur à l'atmosphère.

cirrus

Voir nuages.

cisaillement

Variation sur une courte distance, à l'intérieur d'une couche atmosphérique, de la vitesse ou de la direction du vent. On parlera de cisaillement vertical ou horizontal selon que la variation se fait le long d'une verticale ou dans un plan horizontal.

clathrates

Des molécules d'eau s'associent pour former des cages où une molécule d'un composé non polaire est emprisonnée. Les clathrates de méthane formés de cette façon sont des hydrates, stables quand ils sont enfouis au fond des océans ou dans le pergélisol. La composition isotopique du méthane emprisonné dans les clathrates signe son origine biologique (décomposition anaérobie).

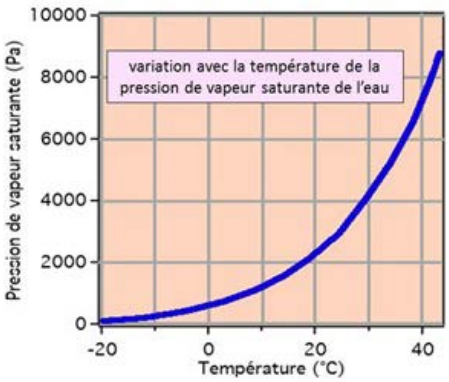
À température ambiante et pression atmosphérique, les clathrates se décomposent pour libérer le méthane emprisonné. Le dégel du pergélisol pourrait ainsi entraîner la libération dans l'atmosphère de grandes quantités de méthane. La déstabilisation des clathrates océaniques par des accroissements de la température ou par des processus géologiques pourrait avoir joué un rôle déterminant dans certaines grandes transitions climatiques de l'histoire de la Terre.

Clausius-Clapeyron

L'équilibre liquide-vapeur de l'eau est régi par la relation de Clausius-Clapeyron qui relie la pression de vapeur saturante à la température :

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T.\Delta V}$$

P est la pression de vapeur saturante, T la température, L la chaleur latente de vaporisation par unité de masse et ΔV la différence de volume massique entre les deux phases. À température ambiante, l'augmentation de 1 °C de la température accroît de ≈ 7 % la pression de vapeur saturante et donc la concentration de vapeur d'eau que l'atmosphère peut contenir.



climat

Pour une région donnée, ensemble des conditions météorologiques avec leurs fréquences relatives et leur cycle saisonnier. Le climat est souvent caractérisé par sa flore et sa faune.

Du fait de la grande variabilité météorologique, la connaissance d'un climat nécessite de prendre en compte une longue période de temps, typiquement au moins trois décennies.

Voir l'encadré « **Diversité des climats** ».

climat global

La définition régionale du climat ne peut être transposée à l'ensemble du globe, qui est soumis simultanément à tous les climats. Le « climat global » est caractérisé par la moyenne globale d'un certain nombre de variables climatiques : température globale, fréquence globale des événements extrêmes… Plutôt que de changement du climat global, il est plus correct de parler de changement global du climat : l'ensemble du globe est affecté simultanément par des changements, mais dont les détails (intensité, fréquence) varient d'une région à l'autre.

Diversité des climats

Quand on parle du climat (au singulier) de la Terre, on se réfère en fait à l'ensemble des facteurs caractérisant le climat dont on donne une vision globale qui intègre les spécificités régionales. Ces facteurs font intervenir les disparités environnementales, et les grands cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone (ou autres cycles biogéochimiques) qui en régulent les caractéristiques aux différentes échelles de temps. La notion réelle de climat s'applique non pas à la Terre entière ni à un continent, mais à des régions définies.

La diversité géographique des climats

Selon les régions, le climat de la Terre a des caractéristiques très différentes. À l'origine, c'est par la végétation qu'il y fait prospérer qu'on définissait les zones climatiques (figure 3-1). À cette caractérisation par la végétation, se superpose une caractérisation par la palette des conditions météorologiques et son évolution avec les saisons.

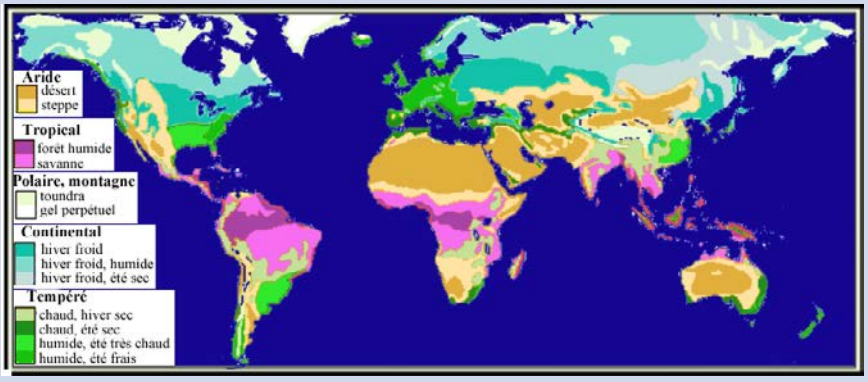


Figure 3-1. Une carte des climats à la surface du globe, établie en fonction de la végétation de chaque région.

La carte de la figure 3-1 met clairement en évidence une structuration en bandes de latitudes, à laquelle se superpose une forte dépendance à la présence des reliefs montagneux et, particulièrement aux moyennes latitudes, une dépendance à la proximité plus ou moins grande des océans dans la direction des vents dominants. Ces grandes caractéristiques sont associées au premier ordre aux caractéristiques latitudinales et saisonnières du rayonnement solaire et des grandes cellules de circulation atmosphérique qui redistribuent l'énergie et l'eau entre les régions sources et les régions puits. Cette carte ne donne toutefois qu'une approximation grossière de la variété des climats. Ainsi, dans un zoom sur une région comme la Bretagne, Météo-France définit six climats différents (figure 3-2). On conçoit donc aisément que, pour caractériser finement les conditions climatiques et leur évolution, il faut un réseau d'observation très fin.

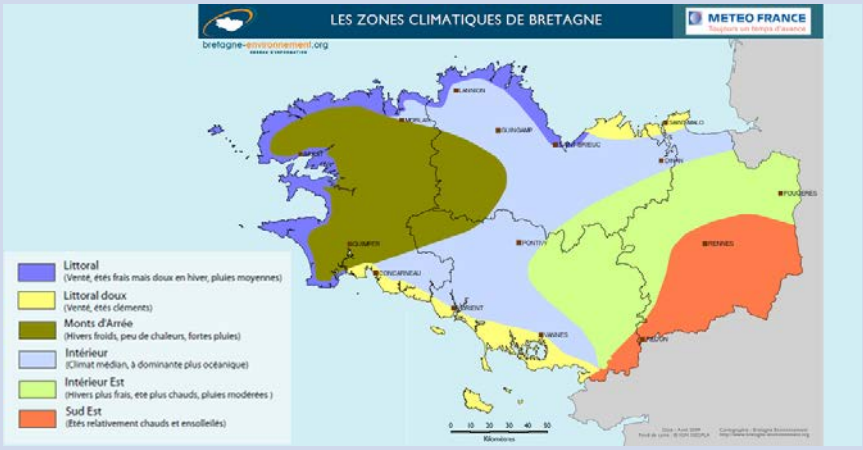


Figure 3-2. Même sur une simple région comme la Bretagne, Météo-France identifie six types de climats bien différenciés.

La variabilité météorologique

Le climat présente une grande variabilité géographique, mais aussi une grande variété de situations météorologiques typiques des différentes régions, pouvant avoir une large gamme d'échelles de temps. Dans nos régions tempérées, le temps est très changeant d'un jour à l'autre. Les écarts de température entre deux jours consécutifs sont souvent bien supérieurs à celui de la température moyenne entre celle régnant au maximum d'une période glaciaire comme il y a 21 000 ans et la température globale moyenne actuelle : cette différence n'est que de 4 à 5 °C (mais cet écart est plus élevé sur les continents, 10 à 15 °C en moyenne européenne).

À des échelles de temps de quelques mois, on est dans le domaine des variations saisonnières, qui dépendent de la latitude, et qui sont liées à l'inclinaison des rayons du Soleil et à la durée du jour, eux-mêmes dûs à l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de l'écliptique. Ces variations saisonnières, très marquées localement, sont quasiment imperceptibles sur la température moyenne à la surface du globe, les effets des saisons s'annulant en moyenne entre les deux hémispères dont les cycles saisonniers sont en opposition de phase. La variation de la température moyenne globale est ainsi principalement le reflet de l'évolution du climat global.

climatologie

Sciences du climat. Du fait de la multitude et de la complexité des interactions entre les composantes de la machine climatique et l'environnement, l'étude du climat fait appel à des spécialistes de domaines très variés : diverses branches de la physique, de la chimie, des mathématiques, de la géologie, de la biologie… Une climatologie caractérise également les conditions climatiques moyennes typiques d'une région donnée.

climato-sceptique

Personne qui n'admet pas que l'homme a une action sur le climat global. Les vrais sceptiques, non convaincus par les informations qu'ils ont reçues, demandent des explications aux spécialistes. D'autres, qui refusent d'admettre que l'homme puisse agir sur le climat, remplacent immédiatement tout argument qui leur est démontré comme faux par un nouvel argument sans rapport avec le précédent.

CMIP

CMIP (*Climate Model Intercomparison Project*) : programme international d'intercomparaison de modèles de climat sous l'égide du programme mondial de recherche sur le climat. Les simulations CMIP ont trois objectifs :

– évaluer les capacités des modèles à reproduire ou à se projeter dans des climats très différents de l'actuel ;
– fournir des projections du changement climatique à court et long terme ;
– comprendre l'origine des écarts entre les projections des différents modèles.

CMIP5 désigne l'ensemble de simulations réalisées dans les divers laboratoires mondiaux qui ont servi de référence au 5e rapport du GIEC.

CCNUCC

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

CNRM

Centre national de recherche météorologique, de Météo France.

CO_2 / dioxyde de carbone / gaz carbonique / acide carbonique

Il est composé naturel de l'atmosphère ; sa concentration depuis des dizaines de millions d'années est de quelques centaines de ppmv (parties par million en volume). Gaz à effet de serre, le second plus important derrière la vapeur d'eau dans l'effet de serre naturel ; très largement en tête dans l'effet de serre additionnel dû à l'action de l'homme.

CO_2-équivalent

Quantité de CO_2 qui produirait le même réchauffement à 100 ans que la quantité considérée des autres gaz injectés dans l'atmosphère.

Le CO_2 étant le principal responsable de l'effet de serre additionnel dû à l'homme, on s'intéresse prioritairement à l'évolution de sa concentration. Pour tenir compte des autres gaz à effet de serre injectés par l'homme dans l'atmosphère, on les remplace souvent par leur équivalent CO_2 (voir pouvoir de réchauffement global).

coalescence

Phénomène par lequel plusieurs particules d'un même corps fusionnent pour donner une particule plus grosse de ce corps. Par exemple, les gouttelettes d'eau au sein d'un nuage grossissent par coalescence avec les gouttelettes voisines jusqu'à ce que leur poids excède la résistance que l'air oppose à leur chute.

combustible fossile

On regroupe sous ce nom le charbon, le gaz naturel, le pétrole et leurs dérivés utilisés comme combustibles pour la production de chaleur ou d'énergie. Ils proviennent tous de la décomposition dans la croûte terrestre d'anciens animaux ou végétaux.

complexité intermédiaire

Qualifie des modèles de climat qui ne prennent explicitement en compte qu'une partie de la complexité du système climatique. Ceci permet d'effectuer des séries de simulations, pour l'étude de processus climatiques, sans que la durée totale de calcul soit prohibitive. On introduit des hypothèses pour traiter de façon intégrée certains phénomènes ou simplifier la représentation géographique. Les modèles de complexité intermédiaire sont largement utilisés sur les climats passés pour comprendre les variations climatiques à long terme. Ils permettent aussi de réaliser de larges ensembles de simulations pour évaluer les incertitudes des projections climatiques futures.

composition chimique de l'air

Elle est donnée dans le tableau.

Gaz	Formule chimique	Abondance (volume) en %
Azote	N_2	78,08
Oxygène	O_2	20,95
Vapeur d'eau	H_2O	0 à 4 (selon la température)
Argon	A	0,93
Dioxyde de carbone	CO_2	0,039
Néon	Ne	0,0018
Hélium	He	0,0005
Méthane	CH_4	0,00017
Krypton	Kr	0,0001
Hydrogène	H_2	0,00005
Xénon	Xe	0,00008
Oxyde nitreux	N_2O	0,00003
Ozone	O_3	0,000004

Composition chimique de l'air. Les pourcentages des gaz autres que la vapeur d'eau sont donnés pour l'air sec. En rouge : les gaz à effet de serre.

composition isotopique

Taux de chacun des isotopes dans le corps considéré.

Un corps simple comme l'hydrogène est un mélange de deux isotopes de mêmes propriétés chimiques (même nombre de protons), mais de masses différentes (nombre de neutrons différent). Les isotopes de l'hydrogène, de masses atomiques 1 et 2 (2 pour le deutérium) ont des abondances relatives de 99,98 et 0,02 %.

Par extension, on appelle composition isotopique d'un corps composé comme CO_2, H_2O, la composition des diverses variétés des molécules de ce corps, chaque atome les composant pouvant être l'un ou l'autre isotope du corps simple considéré. Divers processus physiques ou biologiques altèrent la composition isotopique d'un corps en jeu. Ainsi, la composition isotopique de la neige dépend de sa température de formation (voir thermomètre isotopique).

condensation

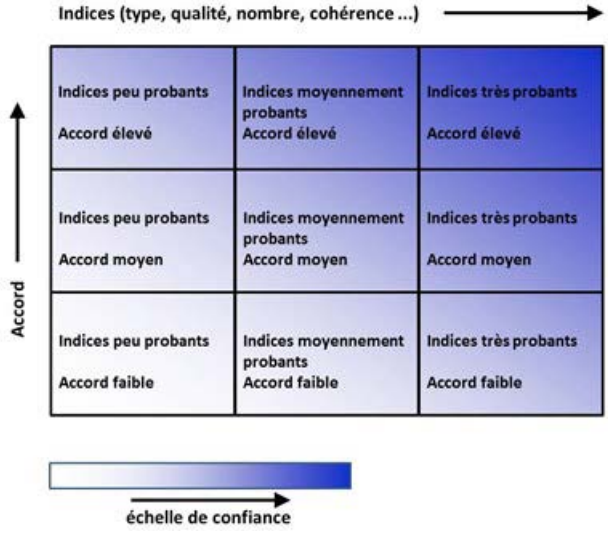
Processus de passage de l'état vapeur à l'état liquide. La condensation de la vapeur d'eau s'accompagne de la libération de la chaleur de vaporisation de l'eau : 540 cal/g, soit $2\ 257 \cdot 10^3$ J/kg.

conférence de Rio ; sommet de la Terre à Rio

Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement, deuxième sommet de la Terre, qui s'est tenue à Rio de Janeiro au Brésil en 1992, avec 110 chefs d'État et de gouvernement et 178 pays représentés. La Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement précise la notion de développement durable : « Les êtres humains sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Ils ont droit à une vie saine et productive en harmonie avec la nature »… « Pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement et ne peut être considérée isolément ».

confiance

Dans le 5e rapport du GIEC, une des métriques pour caractériser les incertitudes sur les conclusions est la « confiance », dans la validité de la conclusion, qui est basée sur le type, le nombre, la qualité et la cohérence des indices et leur taux d'accord ou de désaccord. C'est une appréciation qualitative (ne pas confondre avec intervalle de confiance).



congélation de l'eau de mer

L'eau douce gèle à 0 °C. La présence de sel abaisse la température de congélation. Pour la mer dont la salinité est d'environ 35 g par litre, la congélation commence à – 1,8 °C. En gelant, l'eau expulse une partie de son sel, ce qui abaisserait la température de congélation si l'eau résultante, plus salée et donc plus dense, ne plongeait vers le fond pour être remplacée par de l'eau de salinité normale. La prise en masse de la glace de mer ne se fait qu'après plusieurs jours pendant lesquels la surface se compose d'un mélange d'eau liquide et de cristaux de glace.

constante solaire

Flux d'énergie arrivant du Soleil au niveau de la Terre, actuellement 1 360 $W \cdot m^{-2}$.

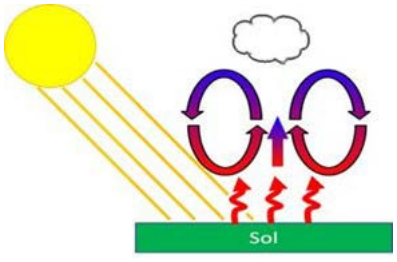
contrainte émergente

Relation statistique empirique permettant de relier une rétroaction spécifique ou un aspect du changement climatique futur simulé, à des variables bien observées dans le climat actuel ou les climats passés. Ces relations permettent d'identifier, dans les ensembles de simulations, les réponses paraissant les plus réalistes ; elles peuvent aussi apporter une évaluation indirecte de phénomènes difficilement observables, ce qui permet de réduire les incertitudes des projections climatiques.

convection

Pour ce qui concerne le climat : mouvement ascendant transportant la chaleur du sol vers de plus hautes altitudes dans l'atmosphère.

Une parcelle d'air plus chaude et donc moins dense que l'air ambiant monte sous la poussée d'Archimède. Le vide créé par l'ascension de la parcelle est comblé par la descente d'air plus froid. Voir équilibre vertical de l'atmosphère.



convection humide

La convection s'intensifie quand elle s'accompagne de condensation de la vapeur d'eau. Quand de l'air humide monte en altitude, du fait de la baisse de température, sa concentration en vapeur d'eau peut dépasser la valeur de saturation ; la vapeur va alors se condenser libérant de la chaleur, dont l'apport en altitude va renforcer la convection.

convection profonde

Quand la convection humide se produit au-dessus d'une surface liquide (océan, sol très mouillé), elle peut provoquer l'aspiration d'air humide, ce qui va encore renforcer la convection. Ce processus est à la base des alizés. C'est lui aussi qui alimente en énergie les cyclones là où la température de l'eau de surface de la mer atteint au moins 27 °C.

coordonnée isopycnale

En océanographie : coordonnée en isodensité de l'eau.

coordonnée sigma

Pression au point considéré divisée par la pression au sol. Elle varie entre 1 en surface et 0 au sommet de l'atmosphère.

Dans les descriptions de l'atmosphère, la pression atmosphérique au point considéré est une coordonnée naturelle, mais elle ne suit pas la surface et interfère avec le relief, ce qui complique la résolution des conditions en limites de la surface. La coordonnée sigma a l'avantage de suivre le terrain.

Pour l'océan, la coordonnée sigma est la pression locale dans l'eau, divisée par la pression au fond.

coordonnée verticale

Pour décrire les phénomènes en altitude dans l'atmosphère, ou en profondeur dans l'océan, on utilise des grandeurs qui permettent une formulation optimale de ces phénomènes, la simple coordonnée en mètres s'avérant peu pratique. Les grandeurs généralement utilisées sont la pression, la coordonnée sigma, la coordonnée isopycnale dans l'océan. Et comme aucune de ces coordonnées n'est parfaitement satisfaisante à toute altitude ou profondeur, on utilise aussi des systèmes hybrides qui combinent plusieurs de ces coordonnées.

COP

Conference of Parties (en anglais).

Voir l'encadré « **L'action internationale, les COPs** ».

couche d'inversion

Couche d'air dans la troposphère, dont la température croît avec l'altitude. C'est une situation inverse de ce qui se passe habituellement. Une cause fréquente est la présence d'un sol plus froid que l'air : surface enneigée ou refroidissement radiatif du sol nocturne.

couche de mélange atmosphérique, couche limite, couche de surface

La couche d'air au voisinage du sol est affectée par les effets de la surface : température et rugosité, responsables de phénomènes de turbulence assurant un brassage rapide (≈ journée) de cette partie de l'atmosphère. Cette couche limite a une épaisseur de quelques centaines à quelques milliers de mètres selon la nature du sol et la température. La partie haute de la couche limite, appelée couche de

mélange, constitue l'essentiel de la couche limite. La partie la plus basse de la couche limite (≈ 10 % du total) est la couche de surface. Au-dessus de la couche de mélange, c'est l'atmosphère libre, les brassages y sont beaucoup plus réduits.

couche de mélange océanique

Couche brassée chaude et donc relativement homogène en température à la surface des océans. Son épaisseur, de quelques mètres à quelques centaines de mètres, dépend de la force du vent et de la température de l'atmosphère. Elle se termine à la thermocline qui sépare ces eaux brassées des eaux profondes stratifiées en température.

courant circumpolaire antarctique

Courant océanique froid circulant d'ouest en est autour de l'Antarctique.

Il relie tous les océans autour de ce continent. Il est engendré par le régime quasi permanent de vents d'ouest. Avec une vitesse de 1 à 4 km à l'heure et un débit de 130 millions de m^3 par seconde, c'est le plus fort courant mondial.

Les eaux septentrionales de l'Atlantique et du Pacifique connaissent des courants océaniques similaires mais de moindre ampleur.

courants-jets

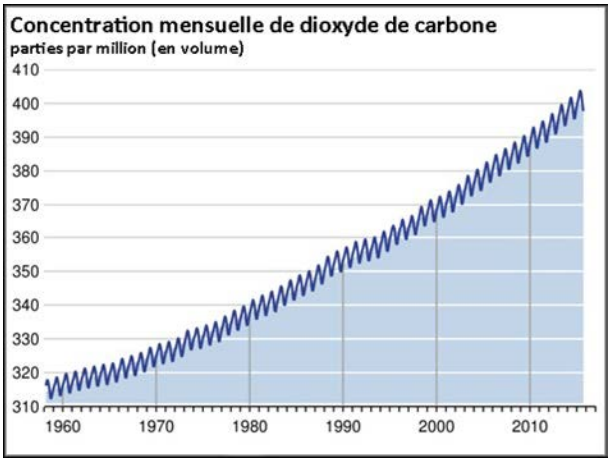
Vents permanents soufflant d'ouest en est en haut de la troposphère à des vitesses pouvant dépasser 360 km/h. Ils se forment au niveau de la branche descendante des cellules de circulation atmosphérique de Hadley et de Ferrel.

courants marins

Voir circulation océanique.

courbe de Keeling

Courbe donnant l'évolution de la concentration atmosphérique du CO_2 mesurée à Mauna Loa (Hawaï) depuis 1958.



L'action internationale, les COPs

Tous les pays sont concernés par l'évolution du climat global, quel que soit leur degré de responsabilité dans cette évolution. C'est donc à l'échelle mondiale que le problème est effectivement discuté depuis trois décennies.

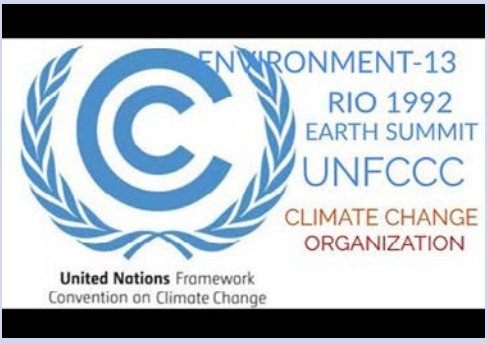
1988 : création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) sous l'égide de l'ONU : Organisation météorologique mondiale (OMM) et Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Sa tâche est de faire l'évaluation détaillée de l'état des connaissances sur l'évolution du climat, d'identifier les possibilités de limiter l'ampleur du réchauffement et de s'adapter aux changements qu'il provoquera.

Le GIEC se compose de trois groupes de travail qui se consacrent respectivement :

- aux bases scientifiques du climat ;
- aux impacts du réchauffement et aux possibilités d'adaptation ;
- aux moyens de limiter le réchauffement.

Il a produit cinq rapports d'évaluation, en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2013-2014. Il produit également des rapports spéciaux qui approfondissent certains aspects de la question.

1992 : sommet de la Terre à Rio de Janeiro. Signature de la convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (UNFCCC en anglais).



À partir de 1995 : tous les ans, une COP : COnférence des Parties signataires de l'UNFCCC.

1997 : la COP3 établit le protocole de Kyoto qui prévoit une réduction globale de 5,2 % en moyenne des émissions de CO_2 en 2012 par rapport à 1990 pour les pays de l'OCDE et de l'Europe de l'Est, y compris la Russie (mais pas les pays émergents dont la Chine et l'Inde). Il est entré en vigueur en 2005 quand assez de pays l'ont enfin ratifié.

2007 : la COP13 à Bali adopte le lancement d'actions d'adaptation au changement climatique. C'est aussi en 2007 que le prix Nobel de la paix est décerné conjointement au GIEC et à Al Gore.

2008 : l'Europe des 27 établit le « Paquet-Énergie-Climat » (« 3 fois 20 % ») qui prévoit d'ici 2020 20 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique européen, une réduction de 20 % des émissions de CO_2 et une amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique.

2009 : la COP15 à Copenhague s'accorde à l'arraché pour limiter à 2 °C le réchauffement de 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

2015 : COP21 (21e conférence des parties) à Paris – Le Bourget : 30-11 au 12-12-2015. L'objectif majeur est atteint : relancer l'action (*après-Kyoto*) sur la base d'un consensus général. Un accord est trouvé, l'Accord de Paris, basé sur les INDC (*Intended Nationally Determined Contribution*, Intention de contribution déterminée à l'échelle nationale). C'est un accord ambitieux, global et contraignant, mais qui ne prévoit pas de sanction en cas de non-respect. L'accord est approuvé par les 195 pays ; il entre en vigueur le 4 novembre 2016.

2016 : COP22 à Marrakech prévoit que le premier bilan des actions d'application de l'Accord de Paris sera avancé de deux ans : 2018 au lieu de 2020. Le Canada, l'Allemagne, le Mexique, les États-Unis présentent leur plan pour atteindre la « neutralité carbone » en 2050. Un accord est conclu sur des plans d'adaptation et promesses de dons des pays riches au fonds pour l'adaptation destiné aux pays pauvres. On note un fort engagement de la société civile.

2017 : les États-Unis quittent l'Accord de Paris ; la COP23 à Bonn voit l'alliance de 25 pays, États et régions (mais ni la Chine ni l'Inde) pour la sortie du charbon d'ici 2030. L'océan est pris en compte dans les problèmes liés au réchauffement.

À l'automne 2018, le GIEC publie un rapport spécial sur un réchauffement limité à 1,5 °C. La COP24 à Katowice manque de dynamisme. Néanmoins, elle trouve un accord sur des règles de mise en œuvre de l'Accord de Paris dans les modalités de suivi des engagements pris par chacune des nations pour la réduction de ses émissions, afin de disposer d'un cadre transparent pour vérifier leur mise en œuvre. Il se crée une nouvelle coalition réunissant 70 pays dont 11 pays européens, « déterminés » à relever leur ambition de réduction des émissions d'ici 2020.

Sur ce site choisi pour son éloignement de toute source de pollution d'origine humaine, Keeling a implanté une station de mesure du CO_2 atmosphérique à l'occasion de l'année géophysique internationale (1957-1958). Dès la deuxième année de mesures, Keeling a obtenu la démonstration de l'accroissement de la teneur en CO_2.

Les oscillations saisonnières sont dues au cycle de la végétation très présente dans l'hémisphère nord.

couverture neigeuse

C'est la couverture de neige qui recouvre les sols continentaux à la saison froide.

couverture nuageuse

Pourcentage de la surface apparente du ciel occupée par des nuages, mesurée en octas (1/8). L'observateur non averti sous-estime la couverture nuageuse quand celle-ci comprend beaucoup de nuages fins (cirrus).

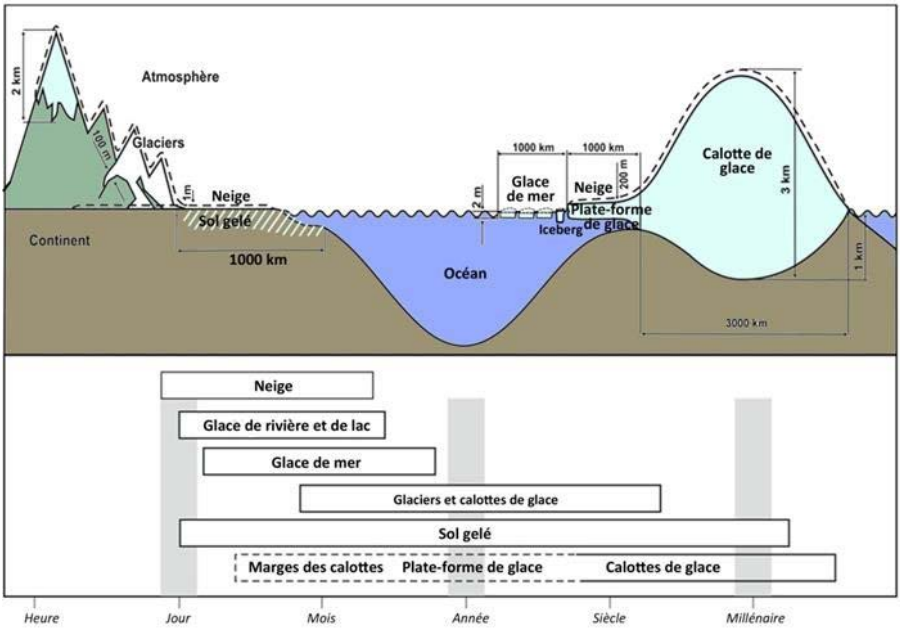
corps noir

Un corps qui absorbe tout rayonnement électromagnétique incident est « noir ». Il émet lui-même du rayonnement électromagnétique avec une intensité et un spectre qui ne dépendent que de la température ; la loi de Planck en définit le spectre, le maximum en est donné par la loi de Wien et l'intégrale de l'amplitude par la loi de Stephan-Blotzmann.

Un corps réel n'est jamais vraiment noir. Cependant son émission s'écarte le plus souvent peu des lois du corps noir.

cryosphère

L'ensemble de l'eau sous forme gelée à la surface terrestre : manteau neigeux, glaciers, calottes polaires, plates-formes de glace, pergélisol et glace de mer, de lac et de rivière.



Les composantes de la cryosphère et leurs temps caractéristiques d'évolution.

Voir l'encadré « **La cryosphère, témoin et acteur du climat actuel** ».

cumulonimbus

Voir nuage.

La cryosphère, témoin et acteur du climat actuel

Parmi les grandes composantes de l'environnement terrestre que sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la cryosphère, la cryosphère est un témoin remarquable des évolutions du climat.

La cryosphère regroupe tout ce qui, à la surface du globe, est sous forme de glace ou contient de l'eau à l'état de glace : les manteaux neigeux, les glaciers continentaux et alpins, les calottes polaires, les plateformes de glace, la glace de mer et la glace des lacs et des rivières, enfin le pergélisol qui est le sol gelé pendant au moins deux ans consécutifs.

La neige et la glace de mer, acteurs du climat

La glace de mer (la banquise) se forme par congélation de l'eau de mer, essentiellement pendant l'automne et l'hiver de l'hémisphère considéré. La neige se forme dans les nuages par agglutination de mini-cristaux de glace lorsque la température est inférieure au point de congélation. À la belle saison, la glace et la neige à la surface fondent partiellement ; de la glace de mer peut subsister plusieurs années.

Loin d'être plate et immobile, la glace de mer est déplacée et disloquée par les courants marins et les vents. Autour de l'Antarctique, la glace de mer est dans un milieu ouvert, vents et courants peuvent la transporter vers de plus basses latitudes, plus chaudes, où elle va fondre. Un tel phénomène est impossible dans l'Arctique où le pôle est dans un bassin océanique cerné par les continents. Un apport important d'eau douce, provenant de la fonte des glaciers continentaux ou de la vidange de lacs sous-glaciaires, provoquera une congélation accrue : l'eau douce gèle à moins basse température que l'eau salée.

La glace ou la neige ont en commun d'interagir avec le climat de diverses façons :

- elles forment une couche isolante entre la surface (océan ou continent) et l'atmosphère, empêchant la surface de céder de sa chaleur à l'atmosphère ;
- les variations du climat sont amplifiées par la formation ou la fonte de ces surfaces qui réfléchissent jusqu'à plus de 80 % du rayonnement solaire. Si la température s'élève, le sol ou l'océan de surface se réchauffent, faisant fondre la couche de glace ou de neige. La fonte de neige ou de glace à la surface en diminue l'albédo et par conséquent amplifie la fonte. On parle de rétroaction positive. Inversement, une eau de mer plus froide permet à la glace de mer de s'étendre et d'accroître l'effet réfléchissant et donc le refroidissement. Ces rétroactions d'albédo expliquent les variations rapides de température dans les régions concernées.

La glace de mer interagit également avec la formation d'eau profonde. Lors de la congélation, le sel est rejeté, ce qui alourdit les eaux de surface déjà très chargées en sel par l'évaporation lors de leur montée des tropiques vers l'Arctique. Ceci favorise leur plongée. Ce phénomène est l'un des moteurs de la circulation océanique méridienne appelée circulation thermohaline qui est l'un des mécanismes fondamentaux pour l'échange de chaleur entre les deux hémisphères et entre la surface et le fond de l'océan.

L'évolution des glaciers reflète l'évolution du climat

Les glaciers alpins évoluent aussi en fonction du climat. C'est l'apport de neige qui fait grossir ces glaciers, et c'est la fonte ou la sublimation de la glace qui les fait décroître. L'évolution du volume d'un glacier est donc déterminée par le bilan entre les apports de neige et la fonte et la sublimation de la glace. La décroissance du volume d'un glacier n'est donc *a priori* pas nécessairement la conséquence d'un accroissement de la température ambiante. Ainsi, c'est l'aridité qui s'est installée sur la région et non la température qui reste négative, qui est responsable de la disparition de la glace au sommet du Kilimandjaro. Sur la quasi-totalité du globe, les glaciers continentaux et alpins régressent fortement du fait du réchauffement climatique. Certains glaciers de l'Himalaya présentent une situation différente : la température qui s'élève accroît la fonte, mais celle-ci est surcompensée par une augmentation des précipitations de neige.

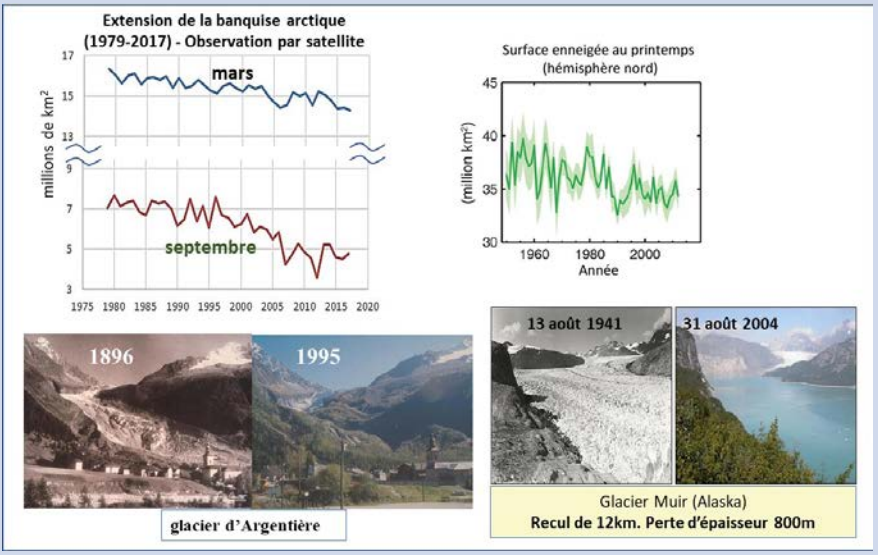


Figure 5-1. La cryosphère reflète le réchauffement climatique. L'extension de la banquise arctique diminue, comme le montrent les courbes tant pour son maximum annuel en mars que son minimum annuel en septembre. La surface enneigée au printemps décroît. Les glaciers alpins et continentaux subissent une diminution drastique. Août 2019 a été marqué par la plus petite couverture de glace de mer mesurée.

La fonte du pergélisol, une menace pour le climat et pas seulement

Le sol gelé en permanence est un substrat rigide. L'activité biologique est figée dans ce substrat froid et rigide. Quand le pergélisol se met à fondre, les micro-organismes se développent et décomposent cette matière organique gelée. Il s'ensuit un dégagement de CO_2 et de méthane, deux gaz à effet de serre, le méthane étant à l'échelle du siècle 25 fois plus efficace que le CO_2 pour réchauffer l'atmosphère. Ainsi, ce dégel va accroître l'effet de serre et donc le réchauffement.

Si le dégel atteint les couches profondes du pergélisol, le risque passe à une échelle bien supérieure. En profondeur, le pergélisol contient des quantités importantes et très mal connues de méthane sous forme de clathrates, des hydrates de méthane. Si ce méthane passe dans l'atmosphère, l'effet de serre sera considérablement accru, entraînant un réchauffement important.

Le pergélisol étant rigide, il constitue un socle bien adapté pour supporter des habitations, des infrastructures... Le dégel du pergélisol, qui s'observe depuis plus d'une décennie dans l'Arctique, transforme ce socle en un matériau à faible cohésion, conduisant à l'effondrement de bâtiments, des routes, voire au glissement de tout le sol sur les côtes marines.

En haute montagne, par exemple dans le massif du Mont-Blanc, la glace ne dégelant jamais, le pergélisol joue un rôle essentiel dans la cohésion d'ensembles de blocs rocheux. Le climat se réchauffant, ce sol gelé arrive à fondre, désolidarisant des masses rocheuses qui s'effondrent en l'absence de travaux pour les fixer au socle rocheux contre lequel elles s'appuient.

cycle biogéochimique

Chaîne cyclique des processus de transport ou de transformation d'un corps chimique dans l'environnement. Le cycle inclut des échanges entre atmosphère, hydrosphère, biosphère… et d'éventuels processus chimiques ou biochimiques. Le cycle biogéochimique le plus important pour le climat est le cycle du carbone.

cycle de l'eau

Circuit suivi par les molécules d'eau dans l'environnement entre leur évaporation sur le continent, leur changement de phase au cours de leur transport dans l'atmosphère, leur précipitation et leur ruissellement continental.

Voir l'encadré « **Le cycle de l'eau** ».

cycle du carbone

Le CO_2, chimiquement inerte, est éliminé de l'atmosphère par capture par d'autres composantes de l'environnement terrestre. Il est largement échangé entre l'atmosphère et les autres compartiments : hydrosphère, biosphère, lithosphère.

Voir l'encadré « **Le carbone dans les enveloppes de la Terre** ».

Le cycle de l'eau

L'eau conditionne toute la vie sur Terre. Son rôle dans le fonctionnement du climat est fondamental. On la trouve sur Terre sous ses trois états physiques : solide, liquide et gazeux.

La Terre, atmosphère comprise, contient 1 370 millions de km^3 d'eau sous forme liquide, dont 1 335 dans les océans, environ 15 dans les eaux souterraines, et peut-être jusqu'à 300 dans les lacs, les rivières, les sols et les cellules vivantes ; 30 millions de km^3 sous forme de glace essentiellement en Antarctique ; 14 000 km^3 dans l'atmosphère, sous forme de vapeur ou de nuages.

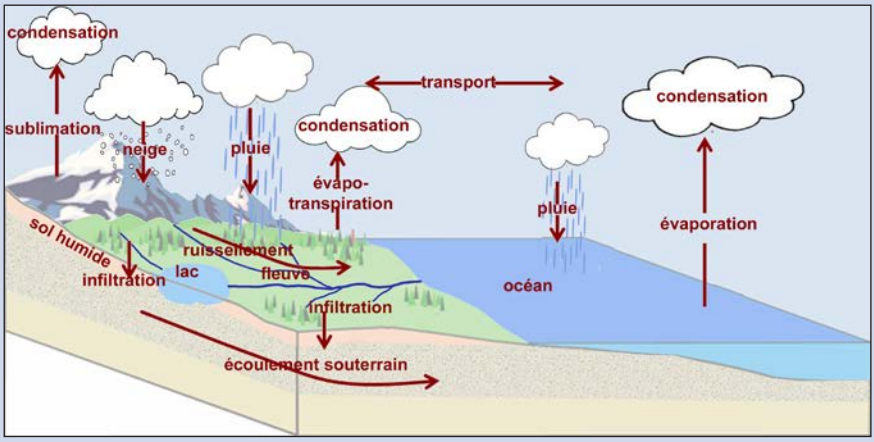


Figure 6-1. L'eau s'évapore, essentiellement des océans mais aussi des continents (évaporation directe et transpiration des végétaux). La vapeur d'eau est transportée par les vents. Dans l'atmosphère, sa condensation produit les nuages. L'eau retombe à la surface en précipitations (pluie, grêle ou neige) au bout d'au maximum 15 jours. Sur les continents, l'eau ruisselle et retourne à la mer par les rivières, ou bien s'infiltre dans le sol pour finalement rejoindre les rivières par les nappes souterraines ou s'écouler directement vers la mer.

Le cycle de l'eau (figure 6-1) passe par l'évaporation. Chaque année, les océans évaporent 413 000 km^3 d'eau et en regagnent directement 373 000 km^3 (soit 90 %) par les précipitations. Les 40 000 km^3 restant pour boucler le bilan transitent par les continents. Ceux-ci reçoivent annuellement 113 000 km^3 d'eau, soit une épaisseur moyenne de précipitations de 84 cm. Sur ces 113 000 km^3, 73 000 km^3 repassent dans l'atmosphère par évaporation directe ou via la transpiration de la végétation. Le reste, les 40 000 km^3 mentionnés ci-dessus, peut soit ruisseler vers les rivières pour retourner à la mer (11 000 km^3), soit s'infiltrer dans le sol pour se déverser dans les nappes souterraines, qui à leur tour vont alimenter les rivières ou rejoindre directement la mer. La fonte des glaciers et des icebergs contribue pour 3 % de l'eau liquide qui va à la mer.

Au sein de l'atmosphère, la vapeur d'eau s'élève par convection et est transportée à distance par les vents. La température baissant avec l'altitude, la vapeur d'eau peut devenir saturante et se condenser pour donner les nuages. De ce fait, la concentration en vapeur d'eau décroît avec l'altitude. Selon l'altitude, la température et les propriétés des noyaux sur lesquels la vapeur se condense, il se forme des nuages de gouttelettes d'eau ou de mini-cristaux de glace. Les gouttelettes et les mini-cristaux grossissent par coalescence. Quand leur poids devient suffisamment élevé pour que la résistance de l'air ne suffise plus à empêcher leur chute, la précipitation se produit, ramenant l'eau à la surface du globe, soit à l'état liquide sous forme de pluie, soit à l'état solide sous forme de neige ou de grêle. Éventuellement, une partie de l'eau se réévapore dans l'atmosphère en dessous du nuage. L'eau évaporée séjourne jusqu'à 15 jours dans l'atmosphère où elle parcourt en moyenne 1 000 km.

Le passage d'une phase à l'autre met en jeu des quantités importantes d'énergie : à 20 °C, la vaporisation consomme 2 501 joules par gramme d'eau (soit 598 calories par gramme ; à 100 °C, c'est 2 257 joules soit 540 calories par gramme), énergie qui est restituée lors de la condensation de la vapeur. La fusion de la glace consomme 333,6 joules par gramme (79,7 calories), que la congélation de l'eau libère. La chaleur libérée par la condensation contribue à maintenir ou renforcer les mouvements convectifs ; ainsi, cette chaleur joue un rôle moteur dans la circulation des régions tropicales ; c'est elle qui permet la formation de cyclones et qui peut accroître leur intensité. Ces changements de phase et le transport ont ainsi une forte contribution dans le cycle énergétique de la Terre.

La loi de Clausius-Clapeyron nous dit qu'une atmosphère plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau. Or, la vapeur d'eau est le premier gaz à effet de serre dans l'atmosphère. De ce fait, elle exerce une rétroaction positive dans le réchauffement climatique : celui-ci fait croître la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui renforce l'effet de serre et donc accroît le réchauffement. Un réchauffement de 1 °C augmente la quantité de vapeur d'eau admissible dans l'atmosphère de l'ordre de 7 %. Les précipitations, elles, n'augmentent que d'environ 3 %. Cette différence provient du fait que les précipitations, via le relâchement de chaleur latente, équilibrent le bilan énergétique global.

Le réchauffement climatique est aussi associé à une intensification du cycle de l'eau alors que la circulation océanique tend à ralentir. Cet apparent paradoxe est lié à la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère et au fait que les précipitations sont surtout augmentées sur les océans alors que de nombreuses régions continentales deviennent plus arides.

cycles glaciaires – interglaciaires

Alternances de périodes froides où, outre l'Antarctique et le Groenland, tout le nord de l'Amérique et de l'Europe est recouvert d'une gigantesque calotte de glace, et de périodes chaudes où ne subsistent que les calottes sur le Groenland et l'Antarctique.

La Terre connaît ces alternances depuis plus de 3 millions d'années. La périodicité du phénomène, de 40 000 ans pendant près de 2 millions d'années, est ensuite passée à environ 100 000 ans. La théorie de Milankovitch explique l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires par les variations des caractéristiques de l'orbite terrestre. L'amplitude des glaciations est fortement conditionnée par les rétroactions d'albédo et d'effet de serre (voir glaciation).

cyclone / ouragan / typhon

Trois termes pour le même phénomène : ouragan sur l'Atlantique, typhon sur le Pacifique et cyclone sur l'Indien. Une tempête tropicale circulant à une latitude pas trop basse au-dessus d'une surface océanique chaude (≥ 27 °C) provoque une forte évaporation. La convection humide qui en résulte alimente en énergie le système qui, sous l'effet de Coriolis, devient tourbillonnaire avec des vents et des précipitations très forts. Au-dessus d'un continent, le cyclone n'est plus alimenté en énergie et s'affaiblit peu à peu. Si sa trajectoire le ramène au-dessus d'un océan chaud, cette alimentation peut reprendre, redonnant de la vigueur au phénomène.

cyclone ; anticyclone

Voir anticyclone.

datation

Attribution d'une date à un événement, ou à un objet (document, échantillon géologique, reste biologique…). Dans la reconstruction des climats du passé, la datation est une nécessité pour pouvoir établir les chronologies entre les phénomènes détectés à différents endroits du globe.

L'échantillon peut être daté par sa localisation dans un milieu d'âge connu, ou grâce à ses propriétés optiques, radioactives, magnétiques…

Voir aussi paléoclimats.

décarboner

Remplacer une activité émettrice de CO_2 par une autre activité aux émissions moindres. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire de décarboner nos sources d'énergie.

déforestation ; reforestation

Déforestation : remplacement d'une forêt par un autre type de surface (agriculture, pacage, urbanisation, industrialisation…). La déforestation émet 1,0 ± 0,5 Gt de carbone dans l'atmosphère par an.

Reforestation : replanter une forêt sur des surfaces qui n'en contenaient pas ou plus ou ont subi une coupe rase.

degré-jour de réchauffement

Cumul des écarts de température par rapport à une température de référence. Pour la période étudiée, le calcul consiste à considérer tous les jours où la température dépasse un seuil donné ; la somme des écarts en degrés à cette moyenne est le nombre de degrés jours de réchauffement.

dendrochronologie

Datation à l'année près de pièces en bois en comptant les cernes (anneaux de croissance) des arbres et déterminant les séquences d'épaisseurs relatives de ces cernes. En comparant différents échantillons de bois de plus en plus anciens mais dont les périodes de croissance se recouvrent (séquences d'épaisseurs communes), on peut remonter jusqu'à plusieurs millénaires avant l'époque actuelle.

Les caractéristiques des cernes dépendent des conditions météorologiques de l'année où ils se sont formés. La dendrochronologie associée à l'analyse des cernes permet donc de remonter à des caractéristiques des climats du passé. Les climatologues nomment par raccourci cette analyse associée à la datation par les cernes « dendrochronologie ».

densité

Rapport de la masse volumique d'un corps à celle d'un corps de référence.

Une variation locale de densité dans un fluide provoque le déplacement du fluide du fait de la poussée d'Archimède. Les différences de densité sont le moteur de la convection, de la circulation thermohaline, et de façon générale de tous les mouvements de composante verticale non nulle au sein de l'atmosphère ou de l'océan.

dépression

Dans l'atmosphère : zone de pression inférieure à la normale.

dérive nord-atlantique

Courant marin de surface qui amène dans le nord de l'Atlantique les eaux chaudes du Gulf-Stream.

La dérive nord-atlantique contribue au climat doux de l'Europe.

L'amplitude de la dérive nord-atlantique est en partie conditionnée par la formation d'eau profonde dans l'Arctique (voir circulation thermohaline), que la disparition de la banquise et l'apport massif d'eau douce par la fonte de la calotte groenlandaise risquent d'entraver.

dernier maximum glaciaire

Période où la dernière glaciation était à son paroxysme il y a 21 000 ans. Une couche de glace de 3 500 m recouvrait alors le nord de l'Amérique et tout le nord de l'Europe, stockant 42 millions de km^3 de glace. Les glaciers alpins avaient une extension considérable. Le niveau de la mer était 120 m plus bas qu'actuellement. La Manche était une plaine traversée par le Rhin dont la Seine et la Tamise étaient des affluents. La température moyenne globale n'était que de 4 à 5 degrés en dessous de la température actuelle.

Le carbone dans les enveloppes de la Terre

Le carbone est présent dans les quatre compartiments des enveloppes de la Terre : l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la lithosphère. Dans l'atmosphère, le dioxyde de carbone est très stable. Aucune réaction chimique ne l'y détruit. Ce sont donc les échanges avec l'hydrosphère et la biosphère qui régiraient sa concentration dans l'atmosphère en l'absence d'action de l'homme.

Annuellement, l'océan émet ≈ 78 milliards de tonnes de carbone vers l'atmosphère et en absorbe ≈ 80 milliards, donnant une séquestration nette de 2,4 milliards de tonnes.

Les continents émettent du carbone (respiration de la végétation et des sols, feux de forêt et de savane) à raison de ≈ 134 milliards de tonnes par an et en absorbent ≈ 138 par photosynthèse. Le flux net est une absorption de 3,2 milliards de tonnes.

Le carbone naturel se trouve sous forme de trois isotopes : le carbone 12 (≈ 99 % du carbone) dont le noyau atomique se compose de 6 protons et de 6 neutrons, le carbone 13 (≈ 1 %) qui a 7 neutrons et le carbone 14 (à l'état de traces) qui en a 8. Le carbone 14 est formé en permanence dans l'atmosphère par interactions entre le rayonnement cosmique et l'azote. Il disparaît par décroissance radioactive avec une demi-vie de 5 730 ans. Le carbone que l'homme injecte dans l'atmosphère est très majoritairement produit par la combustion de carbone fossile (charbon, pétrole, gaz naturel). Se trouvant enfoui depuis des centaines de millions d'années, ce carbone fossile ne contient pas de carbone 14 (^{14}C). Mais il est aussi appauvri en carbone 13 (^{13}C) par rapport à l'océan et à l'atmosphère non perturbée par l'homme. Dans les échanges de carbone entre l'atmosphère et l'océan, la fraction d'origine fossile du carbone absorbée par l'océan sera remplacée par du carbone océanique plus riche en ^{13}C. Dans les échanges avec la biosphère, le ^{13}C n'est pas affecté (le carbone fossile est d'origine biosphérique). Le suivi du rapport carbone $^{13}C/^{12}C$ donne accès au temps de séjour de la molécule de CO_2 dans l'atmosphère : de l'ordre de 3 à 4 ans. Mais il ne faut pas confondre ce temps avec le temps que met la quantité de CO_2 présente de l'atmosphère à en être éliminée puisque plus de 97 % des molécules absorbées par l'océan et la végétation sont remplacées dans l'atmosphère par ce qu'émettent ces deux milieux. La complexité et la variété des processus en jeu font que, même si une part appréciable de la quantité de carbone injecté dans l'atmosphère en est éliminée en moins d'un siècle, il en reste encore une part non négligeable au bout de plusieurs millénaires.

Hydrosphère

L'intensité de la pompe à carbone océanique dépend du cycle du carbone océanique. À l'interface air-mer, du CO_2 se dissout naturellement dans l'eau de mer. Les ions bicarbonates formés peuvent se combiner pour former des carbonates,

mais ceci s'accompagne de la réémission de la moitié du CO_2 initial. Les réactions chimiques caractérisant l'équilibre des carbonates sont :

$$CO_2 + 2\,H_2O \rightleftarrows HCO_3^- + H_3O^+$$

$$HCO_3^- + H_2O \rightleftarrows CO_3^{2-} + H_3O^+$$

ce qui, en combinant les deux réactions, donne :

$$CO_2 + CO_3^{2-} + H_2O \rightleftarrows 2HCO_3^-$$

La quantité de CO_2 qui passe en solution dans l'eau croît quand la température de l'eau diminue, ou quand la concentration du CO_2 en solution décroît. C'est là que le phytoplancton et les cyanobactéries jouent un rôle important : ces organismes chlorophyllés utilisent le CO_2 dissout pour leur photosynthèse. Ils représentent la pompe primaire du carbone dans l'océan. Le CO_2 contribue à la formation du calcaire des coquilles et des exosquelettes, en particulier du zooplancton qui broute le phytoplancton, et de là dans toute la chaîne alimentaire marine. Après la mort des micro-organismes carbonatés, leurs restent tombent vers le fond de l'océan. Une partie du calcaire repasse en solution. Finalement, ce n'est que moins de 1 % de la matière carbonée produite par le phytoplancton qui finira enfouie dans les sédiments au fond de l'océan.

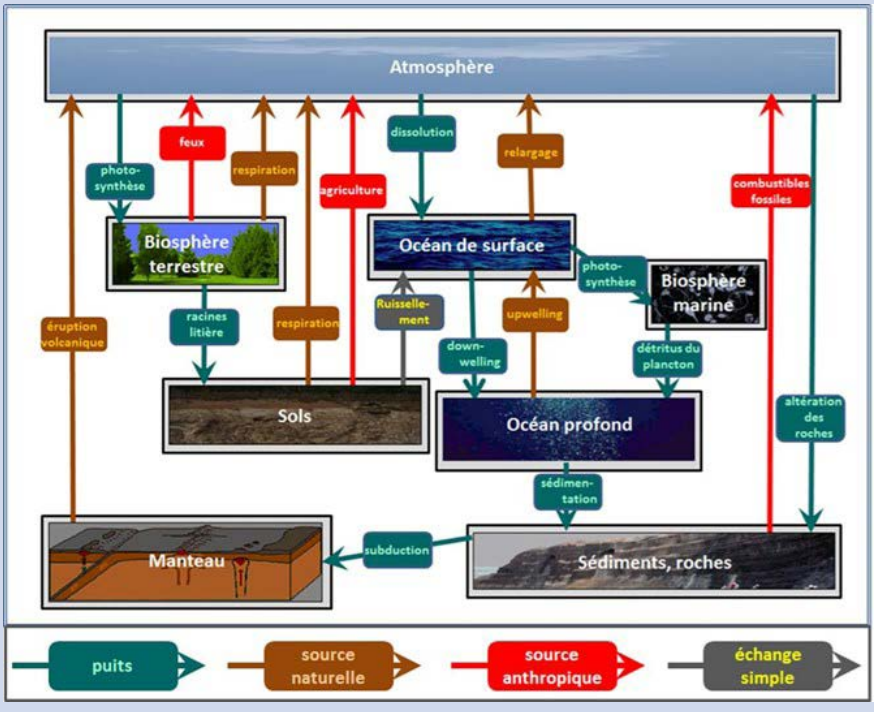


Figure 7-1. Les échanges de carbone entre les différents compartiments de la Terre.

Le CO_2 qui se dissout dans l'eau en diminue le pH, entraînant la baisse de l'alcalinité de l'eau, un phénomène parfaitement mis en évidence par les observations, et qui rend solubles certains calcaires de tests ou de coquilles d'organismes marins. Ceci met en péril l'existence de nombre d'espèces marines. En outre, la solubilité du CO_2 est limitée quand l'eau devient plus acide.

Biosphère continentale

Sur les continents, le cycle du carbone est essentiellement le fait de la végétation à l'échelle de quelques décennies. En période de végétation active, les plantes absorbent le CO_2 pour la photosynthèse qui libère de l'oxygène. L'efficacité de la photosynthèse dépend fortement des conditions météorologiques (rayonnement, température, humidité) et varie donc d'une année sur l'autre. Si la disponibilité en eau est suffisante, l'activité photosynthétique croît avec la température jusqu'à un seuil d'environ 30 °C au-delà duquel elle décroît. Un accroissement de la concentration atmosphérique du CO_2 fertilise les plantes tant que cette concentration ne dépasse pas une valeur seuil. Ce seuil, qui se situe autour de 1 000 ppmv pour la plupart des plantes, est déjà atteint pour les plantes herbacées des régions tropicales.

Dans leur métabolisme, les végétaux brûlent une partie des sucres formés par la photosynthèse et rejettent du CO_2 dans l'atmosphère. Le bilan [photosynthèse – respiration] varie selon les saisons. Dans les latitudes extratropicales, les saisons sont marquées. L'absorption de CO_2 y est dominante en période de végétation. Elle dépasse annuellement les émissions de la végétation de 220 milliards de tonnes (60 milliards de tonnes de carbone).

Le carbone, absorbé dans la partie aérienne des plantes, est largement transporté puis stocké sous la surface du sol dans les racines. La litière composée des détritus des végétaux sur le sol renferme aussi un stock appréciable de carbone. Elle est décomposée par des micro-organismes, de façon d'autant plus efficace que la température et l'humidité sont élevées. En présence d'oxygène, la décomposition produit du CO_2. Si les conditions sont anoxiques comme dans des sols saturés en eau, la décomposition produit pour moitié du CO_2 et pour moitié du méthane, un gaz à effet de serre puissant, qui séjourne une dizaine d'années dans l'atmosphère avant d'être oxydé en CO_2. Une partie de la matière organique des sols est transportée par lessivage vers les océans via les fleuves.

La quantité de carbone présente dans les sols est diminuée par la déforestation et les labours. D'un autre côté, la fertilisation par l'accroissement du CO_2 atmosphérique provoque une augmentation du stockage de carbone dans les sols. Le bilan actuel est au total un stockage de 1,2 milliard de tonnes de carbone par an.

Aux échelles de temps géologiques

L'atmosphère reçoit des volcans ≈ 100 millions de tonnes de carbone par an (1 % des rejets par l'homme). Cette quantité, importante quand elle est cumulée sur des millions d'années, est éliminée par l'attaque des roches silicatées émises par les volcans : les eaux des sols acidifiées par le dioxyde de carbone transforment la roche en argiles et oxydes divers, libérant des ions Ca^{2+} et des ions bicarbonates HCO_3^-, ions qui sont entraînés par les eaux dans les océans où ils se recombinent pour former du calcaire selon la réaction indiquée plus haut. Ce processus géologique majeur séquestre environ 70 millions de tonnes de carbone par an sous forme de calcaire dans les océans. Les carbonates ainsi formés vont peu à peu retourner dans le magma par les phénomènes de subduction. Le magma pourra être repris par les volcans bouclant la grande boucle, qui assure la régulation à très long terme du CO_2 atmosphérique.

À côté de ce processus de séquestration minérale, il existe un autre processus qui séquestre le carbone pour des périodes très longues : l'accumulation de matière organique dans les sédiments où elle échappe à l'action de l'oxygène. De tels stocks plus ou moins transformés sont exploités par l'homme pour ses besoins énergétiques.

désert

Zone aride (précipitations très faibles) et, de ce fait, hostile à la vie.

Les déserts se trouvent sur la branche de subsidence de la cellule de Hadley à des latitudes tropicales. La végétation y est rare voire inexistante. Le plus grand désert du monde est le Sahara.

désertification

Processus, quelles qu'en soient les causes, par lequel une région devient aride, y restreignant considérablement les possibilités de vie.

désoxygénation

Perte d'oxygène d'un milieu naturel (eau). Elle peut résulter d'une consommation anormale d'oxygène ou d'un défaut de ventilation ou de photosynthèse.

détection d'un changement climatique

La détection d'un changement climatique consiste à déterminer que les évolutions climatiques observées ne sont pas liées à la variabilité interne au système climatique, mais à une perturbation externe (voir attribution).

développement durable

Développement qui répond aux besoins actuels sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins.

diffusion (au sein d'un fluide)

Migration de matière ou de chaleur dans le fluide environnant. Le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration (première loi de Fick).

diffusion (rayonnement)

Déviation de photons par les particules du milieu où ils se propagent. La diffusion est élastique si le photon a la même longueur d'onde avant et après la diffusion. Si le photon a perdu de l'énergie (sa longueur d'onde a augmenté), il s'agit d'une diffusion inélastique.

diffusion de Mie

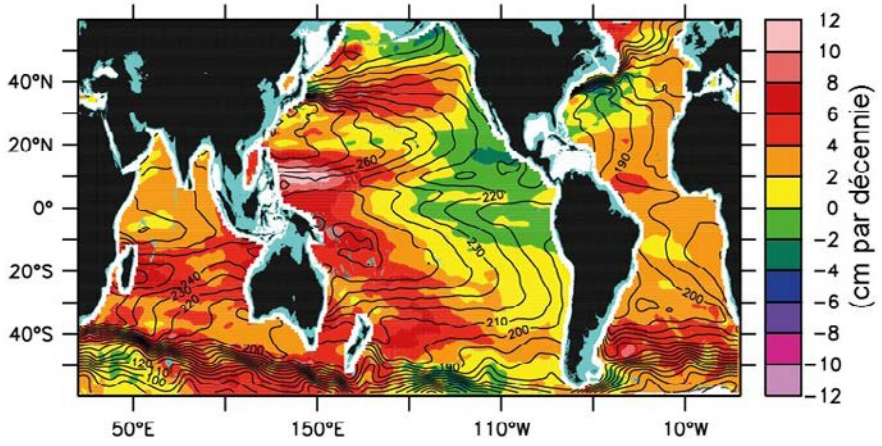
Au sein de l'atmosphère, diffusion de la lumière par des particules (aérosols, gouttelettes d'eau, cristaux de glace) de taille supérieure à la longueur d'onde du rayonnement. La diffusion de Mie est peu sélective en longueur d'onde. C'est elle qui provoque les effets de flou de la brume.

diffusion de Rayleigh

Au sein de l'atmosphère, diffusion de la lumière par des particules (molécules) de taille très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Son intensité décroît proportionnellement à λ^4 (λ = longueur d'onde). Elle est responsable de la couleur bleue du ciel et de la couleur rouge orangée des couchers de soleil.

dilatation thermique des océans

Comme tous les corps, les océans se dilatent sous l'effet de l'augmentation de la température, ce qui induit directement une élévation du niveau de la mer (la fonte des glaces continentales est une autre cause majeure). L'augmentation de température, fortement conditionnée par les courants océaniques, n'est pas uniforme ; l'évolution du niveau de la mer qui en résulte varie notablement d'un point à l'autre du globe.



Évolution du niveau de la mer en cm par décennie. (Source : GIEC AR5 figure 310)

dimensions caractéristiques

Les phénomènes en jeu ont des échelles spatiales très diverses : de la centaine de nm pour les noyaux de condensation des nuages aux milliers de km pour les tourbillons atmosphériques, de 50 à 100 km pour les tourbillons océaniques.

distillation atmosphérique

Processus par lequel la composition isotopique de l'eau évolue entre son évaporation et son retour au sol par précipitation après condensation de la vapeur d'eau.

Lors du transport des masses d'air des régions sources d'humidité vers les régions polaires, la baisse graduelle de la température entraîne des condensations successives. À chaque épisode de condensation, la phase liquide ou solide formant les précipitations est enrichie en isotopes lourds au détriment de la vapeur d'eau résiduelle. Les précipitations successives à partir de cette vapeur ont une composition isotopique de plus en plus appauvrie (voir thermomètre isotopique).

diversité des climats

Selon les régions, le climat est très différent. La latitude, le relief, la plus ou moins grande proximité de l'océan… conditionnent le flux d'énergie provenant du Soleil, les vents, l'humidité de l'air et sa nébulosité, et par conséquent les températures, les précipitations… Aux classifications des climats basées sur les caractéristiques annuelles et saisonnières de ces paramètres météorologiques, se superposent d'autres classifications plus régionales. On distingue :

- les climats tropicaux humides, autour de l'équateur, avec une saison humide et une saison sèche ;
- les climats tropicaux secs, dans les bandes de latitude des régions désertiques, entre 10 et 35 degrés de latitude nord ou sud ;
- les climats sub-tropicaux ou tempérés chauds, à des latitudes plus élevées pouvant aller jusqu'à 45 degrés, très chauds l'été avec une vraie saison hivernale froide. Le climat méditerranéen appartient à cette classe et à la classe suivante ;
- les climats tempérés connaissent une saison chaude et une saison froide. Les deux grands types sont le climat océanique humide avec des étés doux et des hivers frais, et le climat continental au contraste saisonnier plus marqué avec des précipitations surtout estivales ;
- les climats sub-arctiques, ou climats tempérés froids, avec des hivers rigoureux ;
- les climats polaires, froids à très froids toute l'année, avec des vents forts.

doublement du CO_2

Doublement de la concentration atmosphérique du CO_2. Voir sensibilité climatique.

durée de vie (d'un constituant de l'atmosphère)

Voir temps de résidence.

échelle globale ; échelle régionale ; échelle locale

Pour le climatologue, échelle régionale s'oppose à échelle globale. Échelle globale : l'ensemble du globe. Échelle régionale : un continent, éventuellement un pays. En dessous : échelle locale. Cela est lié à la résolution spatiale des modèles numériques de climat qui, de façon standard, est de l'ordre de la centaine de kilomètres.

écosystème

Ensemble constitué d'une certaine variété d'êtres vivants (faune, flore), vivant et interagissant entre eux et avec le milieu environnant.

éémien

Dernière période chaude (interglaciaire), de –131 000 à –114 000 avant l'époque actuelle. Le climat de l'éémien était un peu plus chaud que celui de l'holocène. Sa température a culminé il y a 125 000 ans.

effet de serre

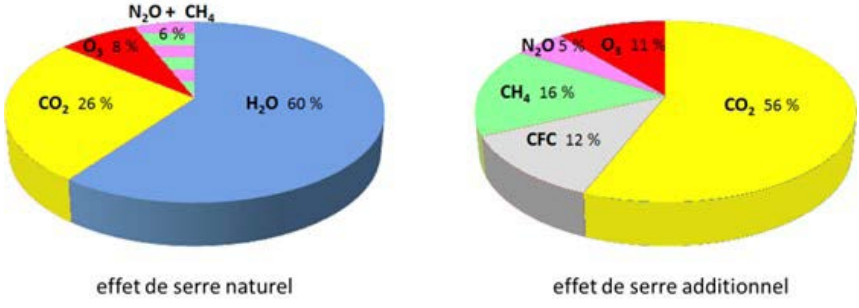
Ensemble de processus par lesquels la présence de « gaz à effet de serre » confine de la chaleur dans les basses couches de l'atmosphère.

L'atmosphère bloque la plus grande partie de la chaleur (chaleur sensible, chaleur latente et rayonnement infrarouge) provenant de la surface. Elle émet à son tour du rayonnement infrarouge, pour moitié vers la surface et pour moitié vers l'espace, et avec une intensité qui décroît avec l'altitude d'émission du fait de la diminution de la température. Il en résulte un confinement de chaleur dans la basse atmosphère.

Voir l'encadré « **L'effet de serre : découverte et identification du rôle climatique** ».

effet de serre naturel ; effet de serre additionnel

L'effet de serre existe indépendamment de l'homme. L'effet de serre naturel, dû principalement à la vapeur d'eau (figure de gauche) assure à la surface de la Terre une température de 15 °C. L'effet de serre additionnel est l'accroissement de l'effet de serre provoqué par les actions humaines.



Contribution des différents gaz à l'effet de serre naturel à gauche et additionnel à droite.

L'effet de serre : découverte et identification du rôle climatique

La Terre reçoit son énergie du Soleil, sous forme de rayonnement électromagnétique (UV, lumière visible, infrarouge). À la distance où la Terre se trouve du Soleil, le flux d'énergie est de 1 360 W/m^2, dans un plan perpendiculaire aux rayons du Soleil. La surface de la projection de la Terre sur ce plan est πR^2, où R est le rayon de la Terre. La surface de la Terre est $4\pi R^2$. La Terre reçoit donc en moyenne 340 W/m^2 de surface.

Une partie du rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace, essentiellement par la surface du globe et par les nuages. Le coefficient de réflexion moyen du globe (son albédo) est de 30 %. Ce sont donc 102 W/m^2 qui repartent vers l'espace. Le reste (238 W/m^2) est absorbé par les enveloppes externes de la Terre, essentiellement le sol et l'océan.

La Terre émet elle-même du rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge conformément aux lois du rayonnement du corps noir. Pour qu'elle ne se refroidisse pas et ne se réchauffe pas, la Terre doit évacuer vers l'espace exactement ces 238 W/m^2. Selon la loi de Stefan-Boltzmann, la température d'un corps noir qui émet ce flux de rayonnement électromagnétique est de –18 °C. Or la surface de la Terre a une température moyenne d'approximativement +15 °C. Cet écart entre la température radiative de la Terre de –18 °C et la température à la surface est dû à un ensemble de processus regroupés sous le nom d'effet de serre.

Les premières mesures concernant l'effet de serre remontent à la seconde moitié du XVIII^e siècle. Le naturaliste suisse Horace Bénédict de Saussure a fabriqué une espèce de panneau solaire portatif (ni le terme d'effet de serre, ni le terme de panneau solaire n'existaient à l'époque) afin de mesurer à différentes altitudes dans les Alpes, la quantité de chaleur que le Soleil était susceptible de fournir. Il a constaté que cette quantité de chaleur dépendait peu de l'altitude alors que la température locale en dépendait. C'est sur la base de cette expérience que Joseph Fourier a, en 1824, énoncé le principe de base de l'effet de serre atmosphérique : « La température de la surface terrestre est augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacles pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air, lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure » (le terme infrarouge n'existait pas à l'époque).

En 1838, Pouillet identifie les deux principaux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau. En 1859, l'Irlandais Tyndall en mesure les taux d'absorption, ainsi que ceux des hydrocarbures. Tyndall est aussi le premier à énoncer l'effet climatique de la vapeur d'eau, dont l'absence dans l'atmosphère une seule nuit d'été ruinerait la plus grande partie de l'agriculture britannique.

La première estimation de la variation du climat global sous l'effet d'une variation de la concentration atmosphérique du CO_2 a été publiée par le Suédois Arrhenius en 1896. Il voulait voir si les variations naturelles plausibles de la concentration atmosphérique du CO_2 étaient susceptibles d'expliquer les cycles glaciaires-interglaciaires dont l'existence avait été mise en évidence au cours du XIX^e siècle. Ses résultats indiquent qu'un doublement de la concentration de CO_2 provoquerait

un accroissement moyen de température de 5 °C, accroissement qui serait maximum aux pôles. Il avait prédit que l'utilisation industrielle du charbon aboutirait à terme à un réchauffement qui lui semblait propice pour l'humanité puisque la température du globe en serait plus uniforme.

Mais, en 1902, Knut Angström mesure l'absorption des infrarouges dans un tube rempli de CO_2 en quantité comparable à ce qui se trouve sur le chemin des rayons infrarouges à travers l'atmosphère. Il trouve que changer d'un facteur 2 en plus ou en moins la quantité de gaz traversé ne modifiait quasiment pas l'absorption. Arrhenius s'était-il trompé ?

Et en 1909, Wood compare la température atteinte dans une serre dont le toit est en verre, avec celle qu'on atteint si l'on remplace le verre qui absorbe les infrarouges par du sel qui ne les absorbe pas. Il ne trouve pas de différence (en fait, il y en a une mais elle est très faible). Donc l'analogie avec la serre est erronée.

Tout ceci trouvera son explication plusieurs décennies plus tard lorsqu'en 1938, Callendar trouve la réponse à l'objection de Knut Angström. La figure 8-1 montre que, pour les longueurs d'onde dans lesquelles le CO_2 absorbe le rayonnement, l'absorption est totale. Augmenter ou diminuer la quantité de CO_2 autour de la valeur atmosphérique ne jouera que sur la part d'absorption des flancs des bandes, donc un effet très faible. Il n'est ainsi pas surprenant que l'absorption globale des infrarouges par le CO_2 ne varie que très peu quand on s'écarte, même d'un facteur 2, de la teneur atmosphérique. La réalité du processus d'émission des infrarouges vers l'espace, c'est que, de même qu'il absorbe des rayonnements infrarouges, le CO_2 émet les mêmes rayonnements. L'atmosphère est elle-même émettrice de rayonnement infrarouge. Si ce rayonnement est émis à suffisamment haute altitude, il ne trouve plus dans son trajet vers l'espace suffisamment de CO_2 pour l'absorber. Mais la thermodynamique fait que, dans un milieu gazeux comme la troposphère sujet au phénomène de convection et chauffé par le bas (par la surface où se produit l'absorption du rayonnement solaire), la température décroît avec l'altitude. Donc plus l'émission du rayonnement qui quitte l'atmosphère se fait à haute altitude, plus la température du gaz émetteur sera basse et plus l'intensité du rayonnement émis sera faible, conformément à la relation de Stefan-Boltzmann. Donc, si on augmente la concentration de CO_2, toutes choses égales par ailleurs, on diminue la quantité d'énergie qui part vers l'espace, qui devient donc inférieure à ce qui est reçu du Soleil. La chaleur s'accumule et réchauffe toute l'atmosphère, jusqu'à ce que le nouveau point d'émission du rayonnement sortant soit à la température qu'avait le point précédent à plus basse altitude (figure 8.2).

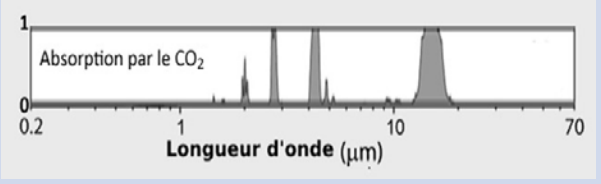


Figure 8-1. Spectre d'absorption des infrarouges par le CO_2 contenu dans la colonne atmosphérique.

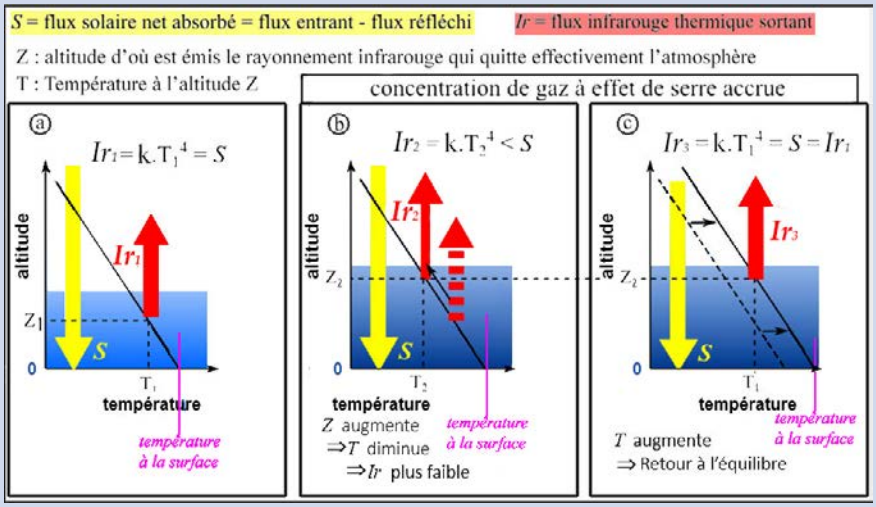


Figure 8-2. À gauche, état initial à l'équilibre. Au milieu, l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre fait augmenter l'altitude d'émission du rayonnement sortant. Il en résulte un déséquilibre entre l'énergie entrante et l'énergie sortante, plus faible. Il y a donc accumulation d'énergie et sous forme de chaleur, qui accroît la température jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli (à droite). (Source Jean-Louis Dufresne)

L'effet de serre résulte donc de l'action combinée du transport vertical de chaleur à travers l'atmosphère (par conduction, convection et rayonnement), et des interactions du rayonnement infrarouge avec l'atmosphère (émission, diffusion et absorption par les molécules de gaz de l'atmosphère). Ce phénomène d'effet de serre qui fait intervenir la structure verticale de l'atmosphère, n'est possible que dans une atmosphère épaisse dont la température décroît avec l'altitude. Les calculs assimilant l'atmosphère à une vitre mince ne sont donc pas réalistes. Le terme « effet de serre » (vraisemblablement inventé par un journaliste au début du XX^{e} siècle) évoque le fait que, comme la serre horticole, l'atmosphère confine la chaleur et donc accroît la température. L'effet de serre atmosphérique a bien un « effet » similaire mais fait intervenir un processus différent.

La température de surface de la Terre est conditionnée par l'effet de serre. Divers gaz émis par les activités humaines, au premier rang desquels le CO_2 (figure de droite), s'accumulent dans l'atmosphère. Absorbant les infrarouges, ils accroissent l'effet de serre. Les nuages bas ont un effet refroidissant car leur effet d'albédo domine leur effet de serre ; les nuages hauts contribuent en revanche d'avantage à l'effet de serre. Les aérosols réduisent l'effet de serre. La vapeur d'eau injectée par l'homme dans l'atmosphère n'en change pas la concentration, qui est régie par la thermodynamique.

effet de seuil

Si elles dépassent une certaine valeur « seuil », des modifications de l'environnement peuvent s'amplifier brutalement ou provoquer des transformations majeures irréversibles. Ainsi un réchauffement de l'Arctique suffisant pour entraîner une fonte en profondeur du pergélisol provoquerait l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre qui emballeraient le réchauffement, interdisant le retour à la situation antérieure pour des millénaires.

effets direct, semi-direct et indirect des aérosols

Les aérosols ont des effets multiples sur le climat.

Effet direct : les particules des aérosols diffusent du rayonnement solaire, limitant le flux qui atteint le sol (effet parasol). Ceci conduit à un refroidissement de la surface sauf pour les aérosols absorbants situés au-dessus de surfaces très réfléchissantes.

Effet semi-direct : un aérosol qui absorbe le rayonnement chauffe localement l'atmosphère, influant sur la formation des nuages.

Effet indirect : les particules des aérosols sont des noyaux de condensation des nuages. Leur concentration influe sur la taille des gouttelettes ou des cristaux de glace du nuage et donc sur ses propriétés optiques (petites gouttes = plus réfléchissant), et sa durée de vie.

L'effet global, refroidissant, est connu avec une précision médiocre.

effet parasol

Les nuages et les particules des aérosols en suspension dans l'atmosphère empêchent une fraction des rayons du Soleil d'atteindre et donc de chauffer la surface du globe. C'est l'effet parasol, très important pour les nuages bas constitués de gouttelettes d'eau.

efficacité énergétique

Mesure de la qualité d'un objet ou d'un système sous l'angle de l'énergie qu'il faut lui fournir pour produire le résultat escompté. Plus cette énergie à fournir est faible, meilleure est l'efficacité énergétique.

efficience d'utilisation de l'eau

Gain de carbone dans la photosynthèse par unité d'eau perdue par évapotranspiration, ou rapport de la production primaire nette (ou du rendement agricole) à la quantité d'eau consommée.

El Niño

Voir ENSO.

émission de corps noir

Voir corps noir.

émissions cumulées

Tout ce qui a été ou aura été émis depuis le début de l'ère industrielle.

émulateur

Algorithme, généralement basé sur des méthodes statistiques avancées ou sur des modèles simplifiés, permettant de reproduire à moindre coût le comportement d'un modèle complexe comme les modèles de climat qui sont basés sur une description mécaniste. Ces émulateurs sont utilisés pour brosser la réponse à de nombreux scénarios socio-économiques ou pour explorer l'impact des choix de paramètres des modèles de climat afin d'en déterminer les meilleurs ajustements conjoints.

énergie décarbonée

Énergie dont la production et l'utilisation ne sont pas (ou sont peu) émettrices de dioxyde de carbone. L'électricité qui, intrinsèquement, n'émet pas de dioxyde de carbone, est carbonée ou décarbonée selon que sa production est ou non émettrice de CO_2.

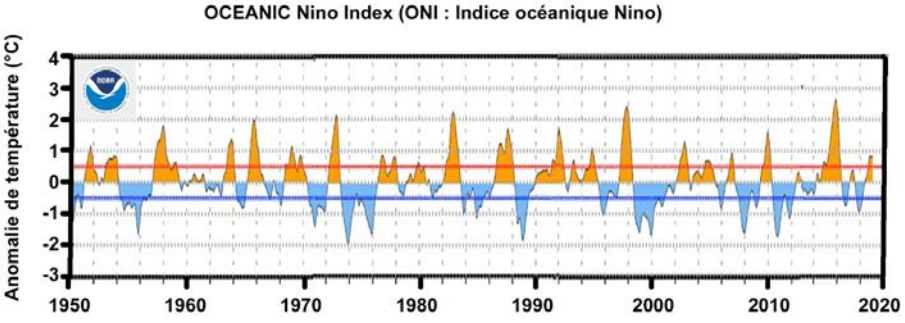
ensemble de simulations

Réalisation de plusieurs simulations permettant de caractériser les facteurs d'incertitude des projections climatiques. Les ensembles multi-modèles par exemple permettent de tenir compte des incertitudes liées à la structure des modèles et aux aspects chaotiques du climat. La moyenne des différentes simulations permet de dégager les estimations robustes de celles qui dépendent des modèles ou de la variabilité climatique. Les ensembles explorent en général les conditions initiales des simulations, les paramètres intervenant dans les paramétrisations physiques, la structure ou la complexité des modèles.

ENSO

ENSO ou *El Niño Southern Oscillation* (oscillation australe El Niño) : oscillation pseudo-périodique du système océan-atmosphère dans le Pacifique équatorial.

Normalement, les hautes pressions se situent à l'est sur les côtes du Pérou, les basses pressions à l'ouest sur les Philippines. Les alizés provoquent une forte évaporation à l'origine d'une activité convective et de précipitations soutenues sur l'ouest du bassin, où s'accumulent les eaux chaudes de surface dans la « piscine chaude » (*warm pool*).



Indice El Niño : température de surface de l'océan Pacifique équatorial autour 150°ouest.

Tous les 3 à 7 ans, les alizés faiblissent, l'eau chaude et avec elle la zone de convection active migrent vers l'est, pouvant provoquer des précipitations intenses sur le Pérou et une grande sécheresse aux Philippines. C'est un événement El Niño (l'« enfant » : il atteint son paroxysme vers Noël). Les effets d'un fort El Niño débordent largement du Pacifique intertropical, affectant l'océan Indien à l'ouest et jusqu'au bord ouest de l'Atlantique à l'est.

Un événement El Niño est souvent suivi du phénomène inverse, La Niña, qui se manifeste par des alizés plus forts qu'à l'ordinaire et un amenuisement de la zone chaude des eaux de surface du Pacifique équatorial.

On caractérise l'état de l'oscillation par divers indices : différence de pression atmosphérique entre Tahiti et l'Australie, températures de surface dans l'océan Pacifique équatorial, voire des indices complexes associant divers paramètres océaniques et atmosphériques.

Voir l'encadré « **El Niño** ».

ensoleillement

Flux d'énergie solaire au sommet de l'atmosphère.

Le déclenchement des glaciations du quaternaire est lié à ce paramètre généralement caractérisé par l'ensoleillement à 65 °N au solstice d'été à midi : il requiert que l'ensoleillement estival aux hautes latitudes de l'hémisphère nord soit insuffisant pour faire fondre toute la neige accumulée en hiver sur ces régions.

enveloppes de la Terre

Ce terme désigne ce qui compose la partie externe de la planète : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la lithosphère.

éocène

Troisième période (56 millions à 34 millions d'années avant l'actuel) de l'ère cénozoïque (tertiaire).

L'éocène a débuté, à la suite d'un réchauffement qui a duré moins de 100 000 ans, par le climat global le plus chaud du tertiaire : températures de l'ordre de 30 °C avec un faible gradient latitudinal. Les continents n'étaient pas dans leur configuration actuelle, l'Antarctique et l'Australie étaient connectés, de même que l'Amérique du Nord et l'Europe via le Groenland, et sans doute l'Amérique et l'Asie par l'actuel détroit de Béring. Le nord de l'Europe était recouvert d'un océan peu profond.

L'éocène a connu un fort remaniement des plaques tectoniques, avec des modifications profondes de la circulation océanique, ce qui a provoqué le refroidissement du climat global.

équateur

L'équateur géographique est la ligne qui sépare l'hémisphère nord de l'hémisphère sud.

L'équateur météoroloqique est la position moyenne annuelle du minimum interhémisphérique de pressions qui est la zone de convergence intertropicale (ZCIT) à 5° de latitude Nord. La ZCIT et donc le minimum de pressions se déplacent cependant avec les saisons entre 3° et 10 °N.

équilibre radiatif

Égalité entre l'énergie qui est apportée à la Terre par le Soleil et l'énergie qui repart vers l'espace (nécessairement sous forme de rayonnement électromagnétique pour pouvoir se propager dans le vide intersidéral).

En cas de déséquilibre radiatif, la machine climatique ajuste sa température et donc son émission de rayonnement électromagnétique, ce qui rétablit l'équilibre.

ERBE

Earth Radiation Budget Experiment : programme de mesure par satellite du rayonnement solaire incident et réfléchi par la Terre et du rayonnement infrarouge qui part vers l'espace. Le premier satellite utilisé pour ERBE, lancé en 1984, a fonctionné plus de dix ans. D'autres missions spatiales (CERES, ScaRaB…) lui ont succédé depuis.

ère industrielle

Période qui a débuté au milieu du XVIII^{e} siècle avec l'utilisation de combustibles fossiles pour faire fonctionner des machines, permettant le développement de l'industrie.

érosion

Dégradation ou transformation du relief et des roches qui le composent sous l'action d'un agent externe.

L'érosion via l'attaque des silicates par l'acide carbonique constitue le processus géologique de séquestration du carbone sur les très grandes échelles de temps.

eustatisme

Phénomène de montée ou descente globale du niveau moyen de la mer.

Ne pas confondre avec l'isostasie.

évaluation d'un modèle

Voir validation.

évaporation

Passage progressif d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux. Ce changement d'état absorbe une quantité de chaleur appelée chaleur de vaporisation (540 calories par gramme, soit 2,257 MJ par kg, pour l'eau).

C'est un processus majeur du cycle de l'eau dans la machine climatique : l'évaporation absorbe de la chaleur, refroidissant la surface. La vapeur d'eau transporte cette chaleur latente, qu'elle restitue là où elle se condense.

El Niño

La variabilité interannuelle du bilan énergétique de la Terre est influencée par les fluctuations internes du climat. Des fluctuations majeures induites par le phénomène *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) interviennent par exemple tous les 2 à 7 ans. Ce phénomène est une oscillation du système couplé océan-atmosphère qui se manifeste dans tout le Pacifique équatorial, du Pérou à l'Indonésie. Actif depuis des millénaires, il nous est connu depuis l'arrivée au Pérou des conquistadors. On en retrouve aussi les traces sur plusieurs millénaires dans les archives climatiques naturelles comme les coraux des îles du Pacifique.

Lors des événements El Niño, l'océan décharge la chaleur accumulée dans la piscine d'eau chaude de l'ouest du Pacifique. Ce transfert de chaleur de l'océan à l'atmosphère s'effectue sous forme de chaleur latente et infrarouge dans l'est du Pacifique qui est plus chaud que la normale. Le réchauffement du Pacifique est associé à un approfondissement de la thermocline qui contribue à inhiber l'upwelling (remontée d'eau froide) équatorial et de la côte Est du Pacifique le long de l'Amérique du Sud. En conditions normales, cet upwelling créé par la divergence de l'alizé du sud-est apporte des nutriments en surface, ce qui favorise une prolifération de vie aquatique pour le bonheur des pêcheurs péruviens. Lors des événements El Niño, les alizés s'affaiblissent, allant parfois jusqu'à s'inverser dans la partie ouest du Pacifique. Les eaux chaudes refluent vers l'est. Sous l'effet de la diminution du gradient est/ouest de température de surface et des vents, la zone de forte convection atmosphérique de l'ouest du Pacifique se déplace vers l'est. Des précipitations intenses peuvent atteindre le Pérou tandis que l'Indonésie est frappée d'une grande sécheresse provoquant des incendies.

Le phénomène qui s'installe en plusieurs mois, dure plus d'une année avec son paroxysme vers Noël, d'où son nom d'El Niño, l'enfant (sous-entendu Jésus). Un événement El Niño peut affecter de vastes régions incluant l'océan Indien et allant jusqu'au bord ouest de l'Atlantique, via des téléconnexions atmosphériques ; le relâchement de chaleur océanique dans l'atmosphère se traduit par une température moyenne du globe plus élevée, des perturbations de la circulation atmosphérique et de la température océanique avec des impacts (précipitations, sécheresses, incendies, rendements agricoles…) sur une grande partie du globe.

Le phénomène peut aussi s'inverser, particulièrement après la fin d'un événement El Niño. Les alizés deviennent encore plus forts qu'à l'ordinaire, la zone chaude du Pacifique équatorial de surface s'amenuise considérablement. C'est un événement La Niña, qui entraîne un refroidissement de la température globale moyenne, particulièrement net lors des épisodes de ce début de XXIe siècle. Ces phénomènes s'atténuent sous l'action des ondes océaniques.

Par leur action sur la température de surface des eaux océaniques équatoriales, les événements El Niño-La Niña peuvent aussi affecter les moussons.

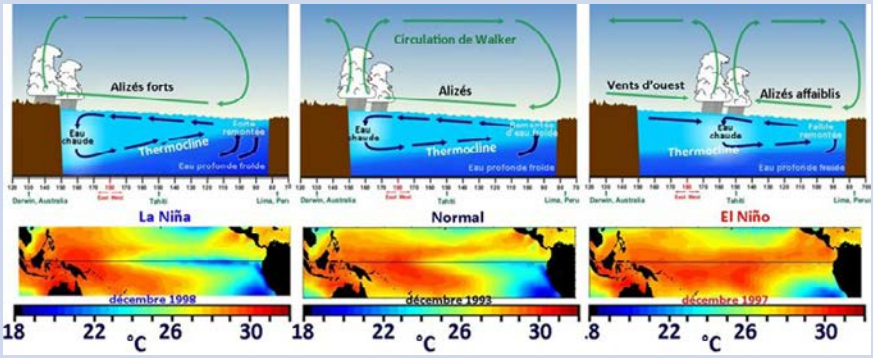


Figure 9-1. Les trois états, La Niña, normal et El Niño, correspondent à des structures très différentes de l'atmosphère et de l'océan dans le Pacifique équatorial. La température des eaux de surface de l'océan en est très affectée.

Plusieurs catégories d'événements ont été répertoriées selon que le maximum de température est atteint à l'est ou au centre du Pacifique. Les téléconnexions dépendent du type d'événement. La plus forte proportion d'événements du Pacifique central dans la dernière décennie interroge aussi sur l'interaction entre la variabilité climatique et le réchauffement d'origine anthropique.

Pour caractériser l'état climatique, on définit un indice El Niño. On a longtemps utilisé l'anomalie de différence de pression atmosphérique entre Tahiti au milieu du Pacifique, et Darwin en Australie, qui caractérise l'intensité des alizés. Elle est significativement négative pour un El Niño et positive pour une La Niña. Il est aussi possible de caractériser l'état par l'anomalie de température de surface de la mer dans le centre est du Pacifique dont les fluctuations reflètent bien le développement des événements El Niño (figure 9-1).

évapotranspiration

Processus associant évaporation de l'eau du sol et évaporation de l'eau transpirée par les stomates des végétaux. Ce processus évacue de la chaleur et contribue à l'humidité atmosphérique.

Sur la photo par satellite du Sud-Ouest de l'Australie (3 janvier 1999), la forêt naturelle, lieu d'une importante évapotranspiration, est couverte de nuages alors que la zone cultivée qui évapore beaucoup moins en est exempte.

événement de Dansgaard-Oeschger

Les événements de Dansgaard-Oeschger, du nom des scientifiques danois et suisse qui ont contribué à les identifier, se produisent en période glaciaire. Constitués d'une phase froide de quelques siècles suivie d'un réchauffement en quelques décennies, ils affectent notablement de nombreux paramètres climatiques de l'Atlantique et de l'Europe et agissent sur la teneur en CH_4 de l'atmosphère.

événement de Heinrich

Longues périodes de refroidissement au cours des déglaciations.

Des traces d'importantes débâcles de glace de la calotte Laurentide (sur l'Amérique du Nord) signalent des apports de grande quantité d'eau douce à la surface de l'Atlantique nord qui auraient bloqué l'apport de chaleur par la circulation thermohaline et provoqué un refroidissement marqué.

événement extrême

Événement météorologique (canicule anormalement intense ou longue, précipitations particulièrement abondantes, froid très intense, ouragan…) conduisant à des conditions très éloignées de la moyenne climatologique.

L'intensité ou la fréquence de tels événements ont de forts impacts sur la vie des gens.

excentricité

S'agissant de l'orbite terrestre : caractère plus ou moins allongé de l'ellipse caractérisant l'orbite de la Terre autour du Soleil. Une excentricité nulle correspond à une orbite circulaire (voir Milankovitch).

expérience numérique

Ensemble de simulations permettant d'étudier la réponse d'un modèle numérique à différentes perturbations des conditions qui lui sont imposées ou de son contenu. Les simulations où la composition de l'atmosphère est modifiée au cours du temps permettent d'estimer l'impact des émissions anthropiques des gaz à effet de serre sur le climat.

externalité

Processus générateur de coûts (les « coûts externes ») liés non directement à une activité, mais induits par ses incidences sur autrui. Les émissions de gaz à effet de serre induisent des effets sur le climat aux impacts coûteux pour la société, mais dont le coût n'est pas pris en compte dans l'activité émettrice de ces gaz.

extinction

En biologie : disparition d'une espèce.

En optique atmosphérique : disparition d'une radiation par suite d'absorption et/ou de diffusion (voir transfert radiatif).

facteur naturel

Facteur qui agit indépendamment de toute action de l'homme.

Le volcanisme, les variations d'activité du Soleil, les interactions entre l'océan et l'atmosphère (voir El Niño)… sont des facteurs naturels d'évolution du climat.

Ferrel

William Ferrel (1817-1891), météorologue américain ayant développé une théorie de la circulation atmosphérique aux moyennes latitudes (voir circulation atmosphérique).

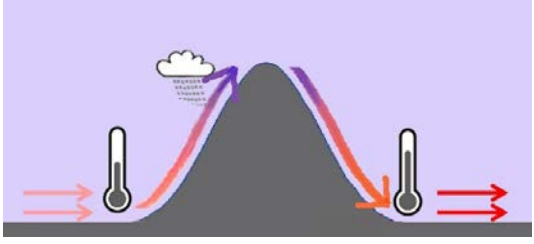
fertilisation par le CO_2

Renforcement de la croissance des végétaux par l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2. L'amplitude de cet effet fertilisant dépend des variétés de plantes.

L'élévation de la température et surtout le stress hydrique, que le réchauffement dû au CO_2 peut provoquer, vont à l'encontre de cette fertilisation.

foehn

Vent sec et chaud descendant d'un massif montagneux. Quand le vent pousse de l'air en direction d'un massif montagneux, le relief force l'air à s'élever, donc à se refroidir, ce qui peut provoquer la condensation de la vapeur d'eau que l'air peut contenir, et l'élimination de l'humidité par précipitation. Quand l'air sec passe sur l'autre versant de la montagne, il va se réchauffer en descendant. Le gradient adiabatique de l'air sec étant plus élevé que celui de l'air humide, le vent arrivant en bas de la montagne est non seulement sec, mais aussi nettement plus chaud que celui qui soufflait au sommet en amont de la montagne s'il était humide. Le foehn est bien connu dans les Alpes, mais un tel vent existe sous un autre nom partout sur Terre où il y a des massifs montagneux.



forçage

Quand une modification de l'environnement perturbe l'équilibre radiatif, la différence induite entre le flux entrant et le flux sortant s'appelle forçage radiatif. Le climat va s'ajuster pour rétablir cet équilibre.

Plus généralement, le mot forçage désigne une perturbation externe à laquelle le climat répond en se modifiant.

force de Coriolis

Dans un système en rotation, un corps en mouvement voit sa trajectoire déviée dans le repère tournant par rapport à ce qu'elle serait en l'absence de rotation du système. Un observateur lié au repère tournant voit la trajectoire qu'aurait ce corps sur un repère fixe s'il était soumis à une force dite force de Coriolis.

Sur Terre, l'intensité de la force de Coriolis varie comme le sinus de la latitude : maximale aux pôles, minimale à l'équateur. Elle dévie les mouvements vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

formation d'eau profonde

Voir circulation thermohaline.

fossile

Voir combustible fossile.

Fourier

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), mathématicien et physicien, connu entre autres pour ses travaux sur la propagation de la chaleur et pour le développement des « séries de Fourier », est le premier à avoir décrit l'effet de serre.

fraction molaire / rapport de mélange

La fraction molaire d'un corps donné est le nombre de moles de ce corps, divisé par le nombre total de moles dans le mélange où il se trouve.

Le rapport de mélange caractérise le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Si un volume donné contient une masse M_h d'atmosphère humide dont une masse M_v de vapeur d'eau et donc une masse $M_s = M_h - M_v$ d'atmosphère sèche, M_v/M_s est le rapport de mélange.

fractionnement isotopique

Modification de la composition isotopique d'un corps lors de transformations physiques ou chimiques.

Un exemple typique est le thermomètre isotopique qui permet de reconstituer les températures du passé à partir des isotopes de l'hydrogène ou de l'oxygène contenu dans la glace des calottes polaires.

Certains processus biochimiques produisent des fractionnements isotopiques : le carbone contenu dans les végétaux est appauvri en isotope 13 par rapport au carbone du milieu environnant.

Future Earth

Future Earth est un réseau mondial de milliers de scientifiques, chercheurs, innovateurs, qui collaborent pour une planète plus durable.

gaz à effet de serre

Gaz transparent dans l'essentiel du spectre de rayonnement électromagnétique du Soleil, et présentant une absorption marquée dans le domaine spectral du rayonnement thermique émis par la Terre.

Les molécules des gaz à effet de serre, composées de 3 atomes ou plus, n'ont pas de plan de symétrie. Elles présentent des bandes de vibration dans l'infrarouge.

gaz industriel

Gaz qu'on ne trouve pas dans la nature, produit par l'industrie pour des besoins spécifiques liés à ses propriétés thermiques, l'isolation électrique, sa stabilité chimique. C'est le cas de gaz halogénés comme les chlorofluorocarbures (CFC à l'origine de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique), leurs substituts dans les climatiseurs… Ces gaz ont un effet de serre puissant et un très long temps de résidence dans l'atmosphère.

gaz réactif

Gaz qui réagit rapidement avec d'autres composants de l'atmosphère. Le monoxyde de carbone CO, l'oxyde nitrique NO_2, les composés organiques volatils… sont des précurseurs de gaz à effet de serre comme l'ozone. Par leurs réactions, ils modifient le temps de résidence atmosphérique de gaz à effet de serre : le temps de résidence du méthane est accru par le CO qui détruit le radical hydroxyle OH, l'oxydant naturel du méthane atmosphérique.

GCM

Voir modèle de circulation générale.

géoïde

Équipotentielle de pesanteur, correspondant à la surface moyenne de la mer, prolongée sous les continents. Le géoïde est en tout point perpendiculaire à la verticale donnée par la pesanteur.

géoingénierie

Technique ayant pour but de stabiliser le système climatique en limitant le réchauffement par action sur l'équilibre radiatif de la Terre :

- en favorisant la séquestration de CO_2 par les océans par apport de fer pour fertiliser le phytoplancton qui utilise le CO_2 pour sa photosynthèse ;
- en générant des écrans au rayonnement solaire incident, par l'injection de soufre dans la stratosphère, ou par la mise en suspension dans l'espace de matière réfléchissante.

Il y a un gros risque d'apparition d'effets secondaires pervers pendant ou lors de l'arrêt de l'utilisation de ces techniques.

géopotentiel

Énergie nécessaire pour élever une masse donnée du niveau de la mer jusqu'à l'altitude considérée au point géographique considéré. Cette énergie tient compte de la diminution de l'accélération de la pesanteur avec l'altitude, de ses variations avec les coordonnées géographiques et de la force centrifuge causée par la rotation de la planète.

GFCS

Le *Global Framework for Climate Services* (cadre global pour les services climatiques). Dans le cadre de l'Organisation météorologique mondiale (WMO), le GFCS a pour objectifs d'accélérer et de coordonner la mise en œuvre de mesures techniquement et scientifiquement bien établies, pour une meilleure adaptation aux effets de l'évolution du climat aux niveaux national, régional et global.

GIEC / IPCC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC (en anglais IPCC, *International Pannel on Climate Change*), a été créé en 1988. Sur la base des publications scientifiques existantes, trois groupes de travail fournissent des évaluations détaillées de l'état des connaissances sur les changements climatiques, sur leurs impacts et les possibilités d'y faire face, sur les stratégies propres à limiter le réchauffement.

Le GIEC a établi cinq rapports d'évaluation, en 1990, 1995, 2001, 2007 et 2013-2104.

Les auteurs des rapports, des spécialistes du monde entier, font bénévolement un travail d'analyse et de synthèse des publications.

En 2007, le GIEC et Al Gore (ex-Vice-Président des États-Unis) ont reçu le prix Nobel de la Paix pour leur contribution dans le domaine des changements climatiques.

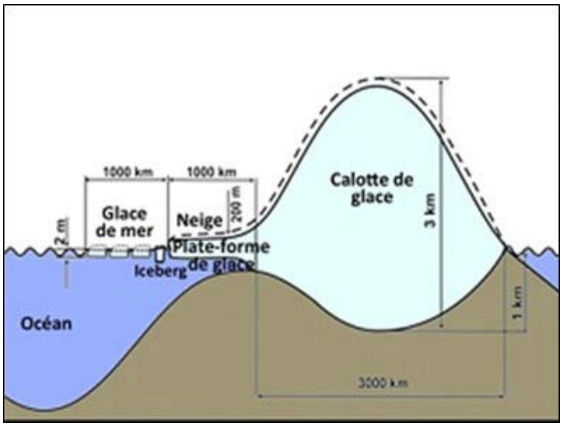
Voir l'encadré « **Le GIEC** ».

gigatonne / pétagramme

1 gigatonne (Gt) = 1 pétagramme (Pg) = 1 milliard de tonnes = 10^{15} grammes.

glace de mer / banquise

Glace qui se forme par congélation de l'eau de mer. Cette glace flotte sur l'eau de mer. Sa fonte n'a pas d'impact direct sur le niveau de la mer. En revanche, le rejet de sel lors de la formation de la glace a un impact sur la densité de l'eau de mer et sur la formation d'eau profonde.



Ne pas confondre glace de mer et plate-forme de glace : les glaciers continentaux s'écoulent dans la mer. Si la couche de glace est suffisamment résistante, elle continue son trajet dans l'eau, en porte-à-faux par rapport au continent dont elle est issue.

glaciaire ; interglaciaire

Voir cycles glaciaires – interglaciaires.

glaciation

Phénomène par lequel aux deux calottes de glace polaires que connaît la Terre, s'ajoutent deux autres calottes, l'une sur le nord de l'Europe et l'autre sur le nord de l'Amérique. Ce phénomène se produit depuis 3 millions d'années. Les périodes chaudes comme l'actuelle étaient brèves (quelques milliers d'années en général).

Une entrée en glaciation n'est possible qu'avec l'accumulation de neige pérenne dans les hautes latitudes continentales de l'hémisphère nord. Cela requiert des caractéristiques orbitales de la Terre particulières : solstice d'hiver proche du périhélie (solstice d'été proche de l'aphélie), excentricité notable de l'orbite terrestre, une forte obliquité. Diverses rétroactions entrent en jeu pour conférer à ce phénomène l'amplitude qu'on lui connaît.

Voir aussi dernier maximum glaciaire.

glacier alpin

Autre nom pour glacier de montagne.

Un glacier alpin s'écoule vers le bas. Il est alimenté par les chutes de neige et perd de la masse par fonte et par sublimation. Sa masse diminue quand ces pertes sont supérieures aux apports par la neige.

Actuellement, tous les glaciers alpins (et continentaux) du monde voient leur masse décroître, sauf certains glaciers himalayens qui bénéficient d'un apport important de neige grâce au renforcement de la mousson.

gradient adiabatique ; gradient thermique

Voir stabilité verticale de l'atmosphère.

grille d'un modèle

Maillage tridimensionnel aux nœuds ou dans les cellules duquel on résout numériquement les équations qui gouvernent l'évolution des deux fluides, atmosphère et océan, équations qui ne peuvent pas être résolues analytiquement.

gulf stream

Grand courant océanique de surface dans l'océan Atlantique. C'est le courant du golfe (d'où son nom) du Mexique. Courant d'eau chaude large de plus de 100 km et d'une profondeur atteignant 1 000 m, il a un débit de 150 millions de m^3 par seconde.

Le GIEC

L'action des climatologues, la présentation de James Hansen devant le Sénat américain, le fort soutien du président des États-Unis (George Bush) et du Premier ministre britannique (Margaret Thatcher), ont amené à la création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC (en anglais IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) en 1988, sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM, en anglais WMO) et du Programme des nations unies pour l'environnement (PNUE, en anglais UNEP).

La structure permanente du GIEC est extrêmement réduite ; un bureau d'une quinzaine de personnes désigné par les gouvernements des 195 pays membres, et un groupe de travail chargé de fournir aux gouvernements de ces pays l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques se rapportant au changement climatique induit par l'homme, aux impacts potentiels de ce changement de climat et aux options pour réduire ce changement et pour s'y adapter.

À cette fin, le GIEC prépare tous les 5 à 7 ans un rapport d'évaluation. Sur la base des publications scientifiques existantes, trois groupes de travail réunissant des centaines de rédacteurs et des milliers de contributeurs venant du monde entier, fournissent des évaluations détaillées de l'état des connaissances sur les changements climatiques, sur leurs impacts et les possibilités d'y faire face, ainsi que sur les stratégies propres à limiter le réchauffement. Les rapports fournissent l'état des connaissances, mais aussi des indications sur les domaines où ces connaissances devraient être approfondies. Les auteurs et contributeurs sont des scientifiques volontaires pour exécuter ce travail pour lequel ils font la synthèse de milliers de publications scientifiques. Les chercheurs qui rédigent ces rapports consacrent une partie de leur temps à ce travail pendant la durée d'élaboration du rapport. Un renouvellement important des auteurs a lieu d'un rapport au suivant. Le premier rapport date de 1990 ; les suivants de 1995, 2001, 2007, 2013-2014. Le prochain est prévu pour 2022.

Afin d'en assurer l'objectivité et d'éviter des omissions, chaque rapport fait par deux fois l'objet de revues par des centaines d'experts qui sont tous des volontaires ayant pu faire état de connaissances scientifiques, même si, pour certains d'entre eux, c'est dans des domaines autres que ceux traités par les rapports : l'apport de regards extérieurs est essentiel. Plusieurs milliers de commentaires sont ainsi fournis et considérés dans les rédactions successives. Les représentants des gouvernements apportent leurs propres commentaires lors de la dernière revue. Cette procédure est assez unique et donne à ces rapports leur statut de rapports de référence reconnus par tous, que n'ont pas les rapports de synthèse.

Le document final est accompagné d'un résumé pour décideurs dont la mise au point finale fait l'objet d'âpres discussions dans une séance plénière avec les représentants des gouvernements. Tout ce qui y est finalement écrit et approuvé en séance a nécessairement l'accord des scientifiques.

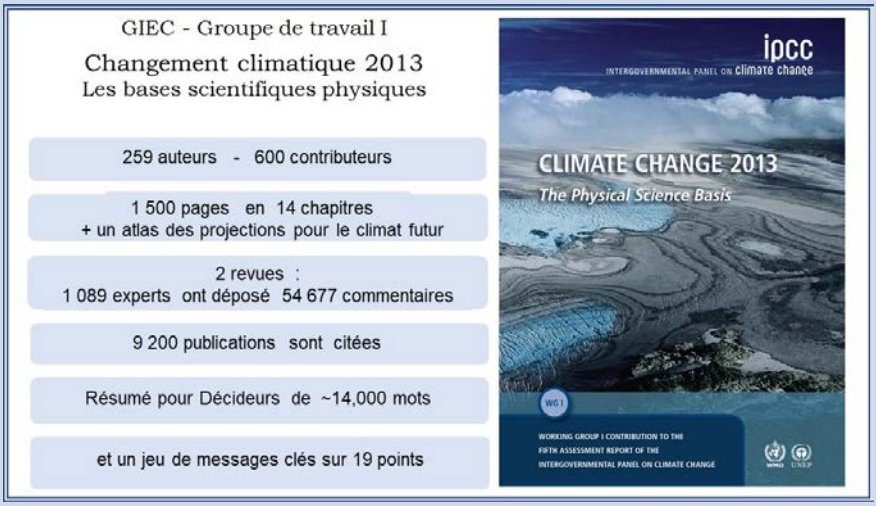


Figure 10-1. Le 5e rapport d'évaluation du GIEC, publié en 2013-2014, se compose de 5 volumes. La figure donne des éléments statistiques sur le volume élaboré par le groupe 1, consacré aux bases scientifiques du réchauffement. Le rapport du groupe 2, impacts et adaptation, se répartit en deux volumes. Le groupe 3 a rédigé un volume sur les moyens envisageables pour limiter le réchauffement. Le 5e volume est une synthèse de l'ensemble.

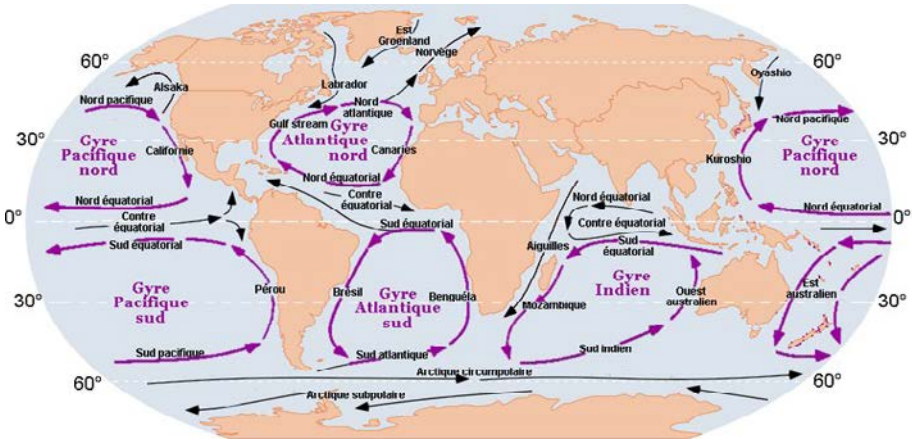
Outre ces rapports d'évaluation, le GIEC produit aussi des rapports intermédiaires spécialisés. Les plus récents sont le rapport sur un réchauffement limité à 1,5 °C (en 2018), le rapport sur le réchauffement et les terres émergées (2019) et le rapport sur l'océan et la cryosphère (2019).

En 2007, le GIEC et Al Gore (ex-Vice-Président des États-Unis) ont reçu le prix Nobel de la Paix pour leur contribution dans le domaine des changements climatiques.

Les eaux de l'Atlantique nord poussées depuis l'Afrique par les alizés forment le courant atlantique nord équatorial. Butant sur le continent américain, elles tournent vers la droite du fait de la force de Coriolis. Plus au nord, elles sont poussées vers l'Europe par les vents de sud-ouest. Le retour des eaux par le courant des Canaries complète le gyre nord-atlantique. La dérive nord-atlantique, branche chaude de la circulation thermohaline, apporte de la chaleur à tout le nord de l'Europe.

gyre

Large système circulaire de courants des grands bassins océaniques. La force de Coriolis les fait tourner vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.



Les cinq grands gyres océaniques de la Terre.

Hadley

George Hadley (1685-1768), avocat et météorologue amateur britannique, a décrit le fonctionnement atmosphérique à l'origine des alizés. On a donné son nom à la boucle de circulation atmosphérique en jeu : la cellule de Hadley.

L'office météorologique britannique a donné son nom au centre de recherches sur le climat d'Exeter : le Hadley Centre.

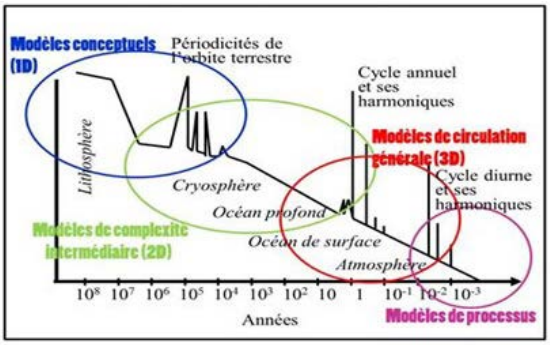
hiatus

Nom donné à la période au début du XXIe siècle où la température moyenne globale a peu augmenté. Diverses hypothèses ont été avancées pour expliquer ce « hiatus » : baisse de l'activité solaire, éruptions volcaniques, stockage de la chaleur dans l'un ou l'autre des bassins océaniques… Certaines études pointant vers une erreur d'appréciation des mesures nient l'existence du hiatus. Quoi qu'il en soit, personne ne met en doute le fait que la quantité de chaleur stockée dans les enveloppes fluides de la Terre n'ait cessé de croître. Les températures de la deuxième décennie du siècle montrent bien la poursuite du réchauffement.

hiérarchie de modèles

Gamme de modèles de complexité croissante.

La vaste hiérarchie de modèles va des modèles conceptuels, modèles de processus, jusqu'à des modèles tridimensionnels du système atmosphère + surfaces continentales + océan + glace en interaction. Le choix d'un modèle dépend de la question à résoudre. Pour une simulation, on cherche un compromis entre le niveau de réalisme recherché et la puissance de calcul disponible.



Hiérarchie de modèles océan-atmosphère. Les plus élaborés concernent généralement les échéances les plus courtes.

holocène

Ère géologique interglaciaire qui a débuté il y a 10 000 ans. C'est au cours de l'holocène que se sont développés le mésolithique, le néolithique et toutes les civilisations ultérieures.

Selon certains, l'holocène serait terminé avec le passage à l'anthropocène, période où l'impact de l'homme se fait sentir sur le fonctionnement du système Terre.

homogénéisation

Traitement de jeux de données d'origines diverses pour les rapporter à la même référence et éliminer les biais systématiques. C'est une opération nécessaire pour les données météorologiques provenant de plusieurs sources ou de capteurs successifs.

humidité relative

Rapport entre la concentration en vapeur d'eau de l'atmosphère et la concentration maximale qu'elle peut avoir à la température donnée. À ne pas confondre avec la concentration en vapeur d'eau.

hydrosphère

Composante du système climatique constituée de l'ensemble de l'eau liquide à la surface du globe : océans, mers, fleuves, lacs, eaux souterraines.

IAM

Modélisation intégrée pour les évaluations socio-économiques et les tests de possibles trajectoires d'atténuation (*Integrated Assessment Modelling*). Modélisation associant dans un cadre unique les principales caractéristiques socio-économiques et les caractéristiques climatiques (biosphère et atmosphère).

îlot de chaleur urbain

Zone où l'activité urbaine provoque un accroissement de la température. Dans les calculs de température moyenne à la surface du globe, les mesures acquises dans les zones concernées sont corrigées de cet effet.

impact du changement climatique

Phénomène conséquence du réchauffement climatique. Le réchauffement climatique a de nombreux impacts, sur le climat (pluviosité, vents, événements extrêmes…), sur l'environnement (surfaces enneigées ou englacées, niveau de la mer, végétation, biodiversité…), sur les activités humaines, sur la santé…

inertie

Tendance d'un système à ne réagir que tardivement ou progressivement à une modification de son environnement.

Dans sa réponse à une modification de forçages (par exemple un accroissement de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre), le système climatique a une grande inertie, due particulièrement à l'océan et à sa capacité calorifique.

inlandsis

Masse de glace terrestre épaisse qui recouvre le sol rocheux.

Un inlandsis s'écoule en direction de la mer où il va éventuellement former des plates-formes de glace avant d'émettre des icebergs. Il existe actuellement deux grands inlandsis, l'inlandsis groenlandais et l'inlandsis Antarctique.

instabilités

Variations rapides qui écartent le système de son comportement moyen.

À notre échelle et à l'époque actuelle, les principales instabilités climatiques sont les oscillations du système océan-atmosphère, dont l'exemple le plus frappant est El Niño. Les glaciations ont été ponctuées de fluctuations rapides du climat comme les événements de Dansgaard-Oeschger.

intensité carbone

L'intensité carbone d'une action ou d'un résultat donné est la quantité de CO_2 qu'il faut émettre pour accomplir une unité de cette action ou obtenir une unité de ce résultat.

interaction

Les diverses composantes de la machine climatique : atmosphère, hydrosphère, biosphère, cryosphère, lithosphère, agissent les unes sur les autres, chacune est modelée par le climat, réagit sur le climat, et, via le climat, réagit sur les autres composantes.

intercalibration

Le suivi des données météorologiques et climatologiques fait appel à de nombreux instruments répartis sur la Terre ou se succédant les uns aux autres. Pour obtenir des séries cohérentes, ces mesures sont intercalibrées, c'est-à-dire calibrées par rapport à une référence commune.

interne

Voir variabilité interne.

IPSL

Institut Pierre Simon Laplace de l'environnement global. Fédération de neuf laboratoires franciliens créée en 1995 par Gérard Mégie, dont les thématiques de recherches concernent l'environnement global. Ces laboratoires élaborent une stratégie commune pour l'étude du Système Terre dans sa globalité ainsi que pour l'étude d'autres objets du Système solaire. Les études sur le climat sont un des axes majeurs de l'IPSL.

irradiance (solaire) / insolation

Flux de rayonnement électromagnétique provenant du Soleil. On l'exprime en $W \cdot m^{-2}$. L'irradiance solaire au niveau de la Terre, 1 360 $W \cdot m^{-2}$ est appelée constante solaire, bien qu'elle varie très légèrement au cours du temps.

irréversibilité / irréversible

Se dit d'un processus qui ne peut s'effectuer que dans un sens : pas de retour possible à l'état initial. En ce qui concerne le climat, on appelle irréversible un processus dont le temps de retour à l'état antérieur est très long par rapport à une vie humaine.

irrigation (action sur le climat local)

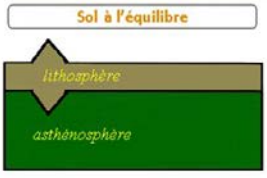
Apporter de l'eau dans les cultures via des canalisations ou la création de marécages. L'apport d'eau sur le sol provoque un accroissement local de l'évaporation qui absorbe de la chaleur provoquant un refroidissement local du climat.

isopycnal

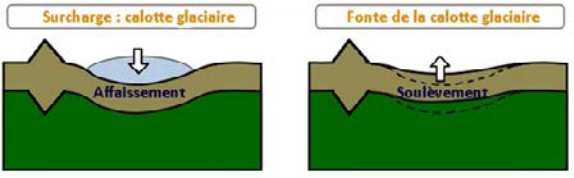
Un domaine isopycnal (ligne, surface ou volume) est un domaine de densité égale en tous points. Aucun mouvement interne ne le perturbe en l'absence de contraintes externes.

isostasie

La lithosphère flotte sur l'asthénosphère plus dense ; donc une surface horizontale en profondeur dans l'asthénosphère est une isobare. Tout relief de la croûte terrestre a son équivalent plongeant dans la couche inférieure visqueuse du manteau. Une modification en surface entraîne une remontée ou une descente de la croûte dans le manteau (l'ajustement isostatique local), un phénomène très lent du fait de la viscosité du manteau. La remontée isostatique du sol due à la fonte des 3 500 m de glace accumulés sur la Scandinavie lors de la dernière glaciation, n'est pas encore terminée.



Lithosphère à l'équilibre isostatique en tout point sur l'asthénosphère



L'ajout ou la disparition de la calotte glaciaire rompent l'équilibre, provoquant des mouvements verticaux de rééquilibrage

isotope cosmogénique

Isotope produit par interaction entre le rayonnement cosmique et les atomes du milieu.

Témoins de l'activité solaire émettrice des rayons cosmiques, les isotopes cosmogéniques sont utilisés pour la reconstruction de l'activité solaire passée et pour les datations. Les isotopes les plus utilisés sont le carbone 14 produit par réaction des rayons cosmiques sur les atomes d'azote 14, et le béryllium 10 produit par rupture (spallation) des noyaux d'azote et d'oxygène.

ITCZ

Voir ZCIT.

Köppen

Wladimir Peter Köppen (1846-1940) : météorologiste, climatologue et botaniste allemand, il a établi une classification des climats à la surface du globe qui, avec quelques modifications, est toujours utilisée actuellement.

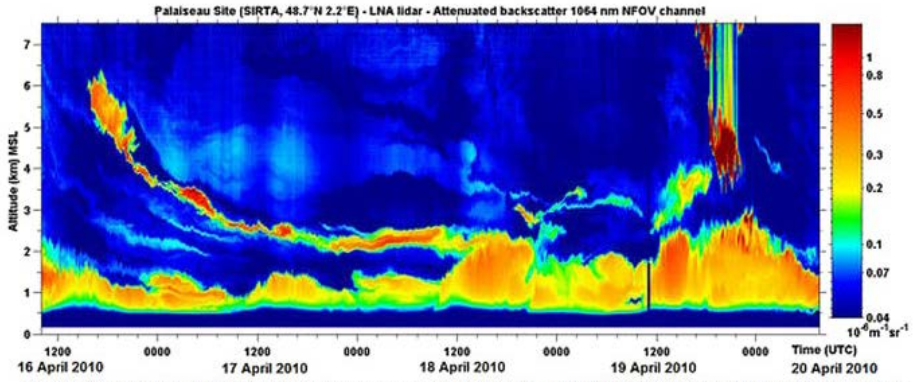
La Niña

Voir ENSO.

lidar

Acronyme de « *light detection and ranging* ». Instrument basé sur l'émission de lumière cohérente et la détection des photons réfléchis ou diffusés par les particules du milieu étudié. Le principe est similaire à celui du radar, mais les longueurs d'onde sont beaucoup plus courtes.

On utilise les lidars pour compter les particules présentes, mesurer les distances qui les séparent de l'instrument, mais aussi mesurer leur vitesse ou les identifier par les caractéristiques du rayonnement diffusé. Dans l'atmosphère, ces particules peuvent être des nuages, des aérosols.



Distribution verticale d'aérosols mesurée par lidar sur le site instrumenté SIRTA de l'IPSL localisé sur le campus de l'Ecole polytechnique à Palaiseau.

© SIRTA

lithosphère

Couche supérieure rigide de la sphère terrestre qui se compose de la croûte (continentale ou océanique) et de la couche supérieure rigide du manteau.

machine climatique

Machine thermique regroupant l'ensemble des milieux et des processus associés qui contribuent à redistribuer la chaleur à la surface de la Terre ou à moduler cette redistribution.

La Terre étant sphérique, la quantité d'énergie qu'elle reçoit du Soleil varie avec la latitude. Environ 50 % de cette énergie est absorbée à la surface du globe et transformée en chaleur. L'atmosphère est donc chauffée par le bas alors que l'océan l'est par le haut. La chaleur est redistribuée sur le globe par les deux fluides de l'enveloppe terrestre, l'atmosphère et l'océan, en interaction. La turbulence et la convection jouent un rôle important dans les mouvements au sein de l'atmosphère et donc dans le transport de chaleur. Pour l'océan, ce sont les courants dont le vent est un moteur important, qui effectuent ce transport. L'évaporation particulièrement importante sur les océans permet le transport de chaleur sous forme latente par l'atmosphère.

Outre l'atmosphère et l'hydrosphère, la machine climatique fait aussi intervenir les autres composantes de l'environnement : biosphère, lithosphère, cryosphère, avec lesquelles se produisent de nombreuses interactions.

maladaptation

Modification apportée aux systèmes humains ou naturels pour se prémunir contre des impacts du réchauffement, et qui s'avère avoir un effet adverse.

manipulation du rayonnement solaire

Voir géoingénierie.

marégraphe

Instrument installé le plus souvent au niveau d'une côte, qui enregistre en continu le niveau de la mer par rapport à la terre à l'endroit considéré. L'isostasie affecte localement les variations enregistrées.

Mauna Loa

Volcan de l'archipel d'Hawaï culminant à 4 170 m d'altitude.

Une station de recherches atmosphériques y est installée depuis les années 1950. Sa situation éloignée des activités humaines et de la végétation en fait un emplacement de choix pour le suivi des constituants de l'atmosphère. La concentration du CO_2 atmosphérique y est suivie depuis 1958 (voir courbe de Keeling).

météorologie

Science d'étude des phénomènes atmosphériques en relation avec le temps (qu'il fait) : paramètres physiques de l'atmosphère (température, pression, humidité), vent, nuages, précipitations.

Les calculs et prévisions météorologiques s'appuient sur un réseau cohérent d'observations. Le grand-duc de Toscane avait constitué un tel réseau, éphémère,

en 1654. Créé par Le Verrier, le réseau moderne fonctionne de manière opérationnelle depuis 1856.

méthane / CH_4

Le méthane (le « gaz naturel ») : puissant gaz à effet de serre, responsable de 15 % de l'effet de serre dû à l'homme. Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'un peu plus de 10 ans.

Il est produit lors de la fermentation anaérobie de substances organiques, dans les lieux humides dont les rizières, dans les termitières, et dans la panse des ruminants. Les feux de forêt en émettent une quantité notable. Une autre source importante se trouve dans l'exploitation des combustibles fossiles (grisou, fuites de gaz naturel). Le méthane de l'atmosphère est à 40 % d'origine naturelle et 60 % d'origine anthropique.

Le fond des océans et le pergélisol recèlent des quantités considérables et très mal connues de méthane sous forme hydratée, les clathrates.

migration de la faune / migration de la flore

Déplacement spontané de populations animales ou végétales pour s'adapter au changement climatique. Il peut se traduire, soit par un déplacement, soit par une extension de l'aire de répartition. Les barrières géographiques (mers, montagnes) ou d'origine humaine (routes, urbanisation, modification de l'usage des sols) peuvent empêcher cette migration et éventuellement condamner certaines espèces à disparaître. La vitesse du réchauffement en cours est aussi un obstacle majeur à la migration de la flore.

Milankovitch

Milutin Milankovitch (1879-1958). Ingénieur, mathématicien serbe. Il a établi la théorie des cycles glaciaires-interglaciaires qui marquent le climat du quaternaire. Voir paramètres orbitaux.

minimum de Maunder

Époque située environ entre 1645 et 1715 durant laquelle le nombre de taches solaires était très faible, témoignant d'une activité solaire plus réduite qu'aujourd'hui.

Le minimum de Maunder est souvent invoqué comme cause du Petit Âge glaciaire, mais celui-ci a débuté avant le minimum de Maunder et aurait été déclenché par une série d'éruptions volcaniques.

mode annulaire

Structure hémisphérique de variabilité de la circulation atmosphérique, qui se traduit par des déplacements nord-sud de la masse de l'atmosphère et donc de la position des vents d'ouest, entre les moyennes latitudes et les régions polaires Arctique ou Antarctique. Le mode annulaire boréal autour de l'Arctique correspond à l'oscillation nord-atlantique. Ces modes fluctuent à l'échelle d'une dizaine de jours, et montrent aussi une variabilité interannuelle et décennale.

modèle couplé

Modèle de climat faisant intervenir plusieurs composantes (atmosphère, océan et éventuellement d'autres) de la machine climatique et leurs interactions.

Les difficultés techniques proviennent des différences de résolution spatiale et de pas de temps entre les diverses composantes, différences liées aux échelles caractéristiques des processus en jeu (voir dimensions caractéristiques, temps caractéristique).

modèle de circulation générale (GCM)

Modèle de climat reposant sur les équations primitives, issues des équations de Navier-Stokes simplifiées pour des couches minces et une terre ronde, et dont l'application est l'ensemble du globe.

modèle numérique de climat

Représentation numérique des enveloppes terrestres et des interactions entre leurs composantes. Mise des équations régulant la dynamique et la physique du climat sous forme de logiciels permettant de les résoudre à l'aide de méthodes numériques sur un ordinateur.

L'espace géographique numérique est découpé en mailles ; les interactions entre mailles sont représentées par des équations mathématiques. Le modèle part de conditions initiales données des paramètres climatiques et les fait évoluer suivant le formalisme mathématique.

modèle spectral

Dans un modèle spectral, les variables atmosphériques sont projetées sur une base de fonctions mathématiques, les harmoniques sphériques (généralisation sur la sphère des harmoniques de Fourrier). La résolution du modèle s'améliore avec le nombre d'harmoniques considérés.

modèles régionaux ou à aire limitée

Modèles ne couvrant qu'une partie du globe mais avec une résolution spatiale fine, actuellement de 10 à 20 km, mais pouvant descendre au kilomètre, améliorant la prise en compte des caractéristiques locales : reliefs, contrastes terre-mer, traits de côte… Ils simulent mieux les processus régionaux que les modèles globaux.

modes de variabilité

Processus internes au climat, qui le font varier à grande échelle de façon répétitive. L'oscillation australe (ENSO), la NAO… sont des modes de variabilité du climat.

monoxyde de carbone / CO

Gaz réactif produit dans la combustion de produits carbonés (foyers, feux de forêt, moteurs…). Le CO réagit avec les radicaux hydroxyle HO* pour aboutir

à la formation d'ozone. Ce faisant, il élimine des radicaux hydroxyle qui sont les réactifs normaux d'oxydation du méthane dans l'atmosphère.

mousson

Phénomène saisonnier se développant dans les régions tropicales. Il est caractérisé par le renversement des vents entre l'été et l'hiver et l'apport des pluies durant la période estivale, par l'air chargé en humidité des océans tropicaux. Particulièrement présente autour de l'océan Indien et l'Asie du Sud-Est, la mousson d'été apporte de fortes précipitations.

Des phénomènes de mousson existent aussi en Afrique subsaharienne et en Amérique du Sud.

Voir l'encadré « **Les moussons** ».

NAO / oscillation nord-atlantique

Voir oscillation.

Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes (Henri Navier, mathématicien ingénieur ; George Gabriel Stokes, physicien) décrivent le mouvement des fluides. La résolution de ces équations aux dérivées partielles non linéaires, généralement impossible analytiquement, se fait de façon numérique.

nébulosité

Fraction du ciel occupée par des nuages. Elle se mesure en octas.

neutralité carbone

Situation où la quantité de CO_2 émise par l'homme est entièrement compensée par ce qui est absorbé.

niveau de la mer

Hauteur moyenne de la surface de la mer par rapport à un géoïde de référence. D'abord mesuré par des marégraphes, le niveau de la mer l'est aussi depuis 1992 par des satellites altimétriques. Il varie avec les apports d'eau (fonte des glaces continentales, précipitations, ruissellements) et avec la température de l'eau (dilatation thermique).

Voir l'encadré « **Le niveau des océans : mesure, évolutions** ».

niveau de référence

Niveau moyen de la mer à une date donnée. Sa détermination demande un travail de filtrage des données pour s'affranchir des fluctuations rapides et corriger des effets de l'isostasie.

non-linéarité

Propriété d'un système dont l'évolution n'est pas proportionnelle à la cause de cette évolution.

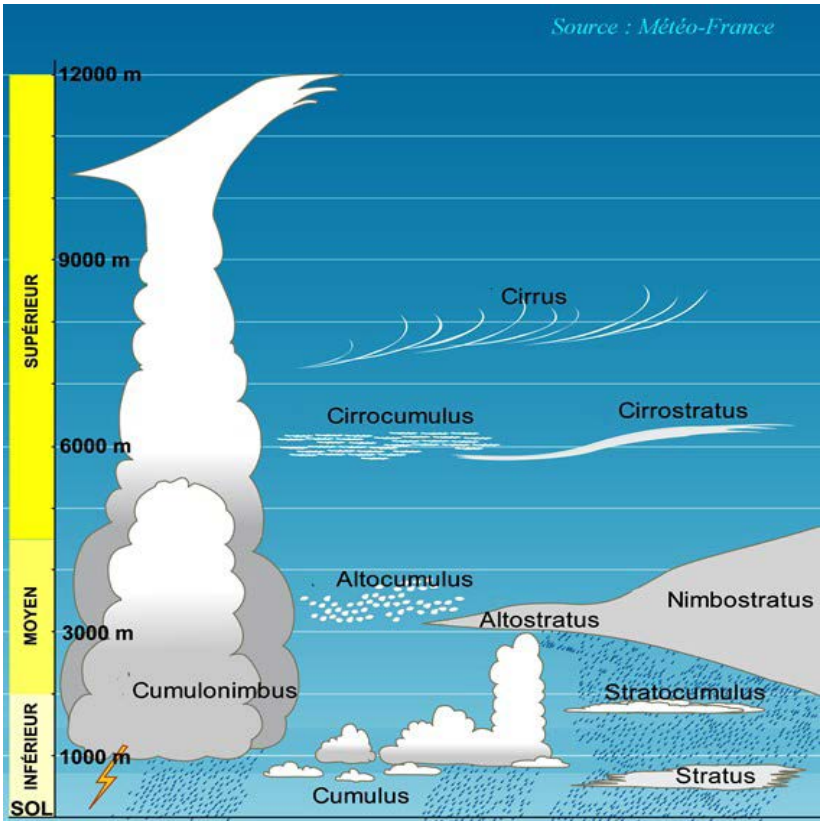
noyaux de condensation

Particules (aérosols) d'origine continentale (poussières, suies) ou océanique (sulfates), présentes dans l'atmosphère, sur lesquelles la vapeur d'eau se condense pour former les nuages. Leur présence est indispensable pour la condensation de la vapeur d'eau.

nuage ; cumulus ; stratus

Ensemble de gouttelettes d'eau ou de mini-cristaux de glace en suspension dans l'air. Un nuage est blanc. Il apparaît gris plus ou moins foncé en fonction de la fraction de la lumière solaire qu'il empêche de le traverser.

Selon son altitude, sa composition et sa forme, on distingue différents types de nuages (voir figure). Ils sont regroupés en deux grandes familles, les cirrus caractérisant les nuages sous forme de strates et les cumulus, les nuages sous forme de chou-fleur.



obliquité

Voir paramètres orbitaux.

Le niveau des océans : mesure, évolutions

Le niveau des océans fait l'objet depuis 1993 de mesures très précises par satellite. Les données antérieures provenaient de marégraphes. Un marégraphe est une jauge placée en général au bord des côtes et en particulier dans les ports. Il permet de mesurer le niveau de la mer par rapport au sol à l'emplacement où il se trouve. Cette mesure sera différente d'un endroit à l'autre. En effet, la mer n'a rien d'une surface plane (ou plutôt sphérique) telle qu'on peut l'observer dans un récipient clos ou une mare en l'absence de vent. Les vents, les courants marins, mais aussi les variations locales de la gravité et de la pression atmosphérique provoquent l'accumulation d'eau à certaines localisations au détriment d'autres régions. En outre, le niveau du sol est sujet à des variations. La remontée du continent, ou isostasie, est par exemple bien répertoriée en Scandinavie et reflète la perte de poids liée à la fonte de la calotte lors de la dernière déglaciation. Dans d'autres régions, comme à Venise, le sol s'affaisse sous l'effet d'un pompage important des nappes phréatiques.

Les mesures par satellite obtiennent maintenant le niveau de la mer avec une précision millimétrique sur le niveau moyen. Ceci est possible grâce à une détermination très soignée de la position du satellite et à la précision de la mesure radar de la distance du point observé au satellite. Le traitement des données est complexe puisqu'il faut tenir compte des marées, de la hauteur des vagues…

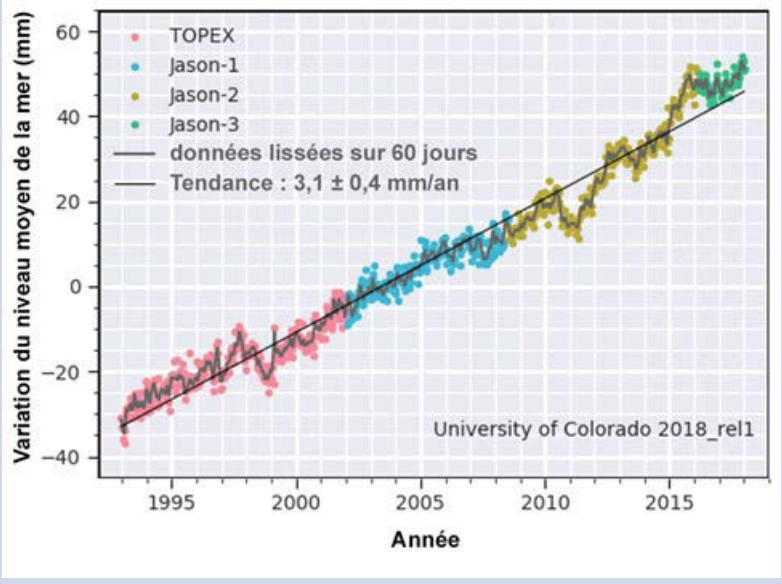


Figure 11-1. Évolution du niveau moyen global de la mer depuis 1993, début des mesures par satellite.

Le niveau de la mer monte pour deux raisons, d'une part la dilatation thermique des eaux, d'autre part la fonte des glaciers continentaux et alpins. L'océan est un intégrateur de chaleur. Il stocke 93 % de l'énergie induite par l'activité humaine. L'atmosphère n'en stocke qu'environ 1 %. Le reste est stocké pour moitié dans le sol et pour moitié absorbé par la glace.

La courbe d'évolution du niveau de la mer (figure 11-1) est certainement un meilleur indicateur du réchauffement que la température moyenne à la surface du globe. Elle montre clairement le réchauffement, y compris pendant la première décennie du vingtième siècle où le réchauffement de l'atmosphère était bien ralenti. Noter toutefois sur la figure les fluctuations et en particulier le creux vers 2011, attribué à une intensité exceptionnelle des précipitations qui ont laissé temporairement des quantités importantes d'eau sur les continents.

La montée du niveau des eaux n'est pas uniforme à la surface de l'océan. Elle est plus élevée là où l'eau se réchauffe davantage. Les courants marins contribuent également à apporter les eaux les plus chaudes dans certaines régions. Les régions côtières y sont particulièrement menacées par la montée des eaux, comme c'est le cas pour des États insulaires du Pacifique. L'accélération de la hausse du niveau de la mer depuis une décennie est particulièrement nette sur cette figure et provient de la fonte accrue des glaciers.

observation par satellite

Les satellites permettent l'observation et le suivi de nombreux paramètres de l'environnement terrestre. Les satellites géostationnaires (fixes par rapport au sol), à 36 000 km d'altitude au-dessus de l'équateur, observent en continu environ un tiers du globe, mais leur résolution spatiale est limitée et ils ne couvrent pas les hautes latitudes. Les satellites à orbite polaire à 800 km d'altitude couvrent quotidiennement l'ensemble de la Terre en 14 orbites par jour. D'autres satellites ont des orbites différentes, adaptées à l'objet de leurs observations.

Voir l'encadré « **Pourquoi des mesures par satellite** ».

océan

Grand volume d'eau salée qui recouvre 71,1 % de la surface de la Terre avec une profondeur moyenne de 3 700 m.

OMM

Organisation météorologique mondiale (en anglais, WMO, *World Meteorological Organization*).

onde de gravité

Pour un liquide : onde se déplaçant sur la surface libre du liquide soumis à la gravité ; par exemple, les vagues sur l'eau. En météorologie : oscillations verticales

Les moussons

Les régimes de mousson reposent sur le renversement saisonnier des vents des régions tropicales et subtropicales entre le continent et l'océan. Ils conditionnent fortement la saison humide et les ressources en eau des régions concernées et ont un impact considérable sur la vie des très vastes populations de ces régions.

Les grandes régions de mousson se caractérisent par un cumul annuel des précipitations supérieur à 300 mm et une amplitude annuelle entre les moyennes d'été et d'hiver des moussons représentant plus de la moitié du cumul annuel.

La mousson règne sur les régions continentales proches de l'équateur et bordées par un océan dans l'hémisphère opposé. Elle est souvent décrite comme un grand régime de brise affectée par la rotation terrestre entre l'océan et le continent. Le continent a une inertie thermique plus faible que l'océan. De ce fait, en été, il se réchauffe et devient beaucoup plus chaud que l'océan, qui, de l'autre côté de l'équateur, se trouve en hiver. Ce contraste thermique se traduit par un fort contraste de pression barométrique. Les vents vont donc souffler vigoureusement de l'océan vers le continent tout en étant déviés par la force de Coriolis. Sur son trajet océanique, l'air va se charger abondamment en humidité qui se transformera en pluies intenses sur le continent. Cette vision est cependant imparfaite et a été complétée par un point de vue énergétique où la mousson participe à la redistribution d'énergie entre les hémisphères et entre le continent et l'océan.

Prenons le cas de l'Inde. Dans l'océan Indien, les vents forts de sud s'établissent au voisinage de la côte africaine où ils sont canalisés par les reliefs montagneux. Ces vents se chargent d'humidité et vont donc apporter de la pluie. Sur le continent asiatique, ce phénomène est fortement accentué par l'ascension de l'air, forcée par la présence des reliefs montagneux, chaîne des Ghats sur la côte ouest puis l'Himalaya et plateau tibétain. De plus, sur ce plateau en altitude, le réchauffement de l'air constitue une source de chaleur élevée dans l'atmosphère. L'air montant en altitude va provoquer la condensation de la vapeur d'eau qu'il contient, donnant lieu à de fortes précipitations (voir la figure 12-1) et favorisant le flux d'humidité. Ce phénomène de mousson entraîne un déplacement vers le nord de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), dont la bande de pluie associée se déplace, en été, entre un maximum sur le continent et un maximum sur l'océan en hiver. La mousson va durer jusqu'à ce que, l'été étant passé, la température de l'océan ne soit plus 24 heures sur 24 inférieure à celle du continent.

Les hautes pressions vont alors être sur le continent poussant l'air vers la mer. En Asie, on aura alors un phénomène de foehn provoqué par la descente d'air des massifs montagneux. L'air sec, venant de Sibérie, va subir une compression adiabatique en descendant des massifs montagneux, ce qui va donner sur le pays un vent sec et chaud.

Le phénomène de mousson ne se limite pas à l'Inde. Il touche aussi une bonne part de l'Asie du Sud-Est. Il se manifeste également en Amérique du Sud, au nord de l'Australie, et en Afrique sub-saharienne. Dans l'Afrique sub-saharienne, le contraste entre la température de l'océan dans le golfe de Guinée et la température

sur le Sahara provoque une mousson, la source d'eau du Sahel, mais dont l'intensité est très variable selon les années. C'est grâce à un régime de mousson beaucoup plus marqué qu'actuellement que le Sahara a pu être vert il y 6 000 ans.

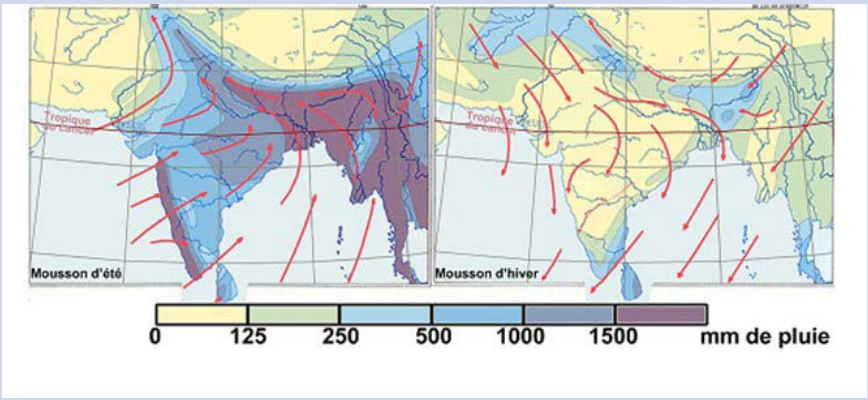


Figure 12-1. Cartes de pluviosité sur l'Inde et les pays voisins. À gauche, saison humide avec la mousson d'été ; à droite, saison sèche avec la mousson d'hiver. En hiver, la situation thermique est inverse.

L'intensité de la mousson est conditionnée par la quantité de chaleur apportée par le Soleil aux continents concernés. Cette quantité est liée à l'intensité du rayonnement solaire estival sur ces continents. Elle est maximale quand la Terre est proche du périhélie au solstice d'été et l'obliquité élevée. Les fluctuations interannuelles de la mousson sont liées aux modulations des températures océaniques d'une part et à divers facteurs continentaux modifiant la façon dont l'énergie solaire réchauffe la surface continentale, comme la neige, l'humidité des sols ou le couvert végétal. Les téléconnexions de grande échelle font aussi que ces perturbations ne sont pas nécessairement locales dans les régions de mousson, mais peuvent provenir d'autres bassins océaniques que celui sur lequel se développe le flux de mousson, ou provenir des moyennes et hautes latitudes. Il y a en particulier des liens assez forts entre la mousson et le phénomène El Niño/La Niña, les années La Niña favorisant par exemple une mousson intense en Inde. La saison des pluies est également ponctuée de périodes d'activité intense et de pause dont les caractéristiques varient d'une année à l'autre. D'autres perturbations des moussons sont causées par l'activité humaine, qu'il s'agisse du réchauffement en cours ou des émissions d'aérosols liés à l'activité humaine en Asie. Ces derniers tendent à réduire l'intensité des pluies de mousson. Il reste de nombreuses interrogations sur le devenir des régimes de mousson pour lesquels les projections climatiques sont encore incertaines. Les facteurs de discussion concernent la répartition des pluies entre le continent et l'océan et le rôle de l'utilisation des sols, qui modifie la façon dont l'eau précipitée est recyclée par évaporation. Ces facteurs varient d'une région à l'autre.

de pression causée par une masse d'air animée de mouvements verticaux sous l'effet combiné de son poids et de la poussée d'Archimède. On trouve ces ondes à l'interface de couches d'inversion ou de cisaillement vertical, ainsi que sous le vent de reliefs qui font obstacle à la circulation de l'air. Dans certains cas, elles sont marquées par la mise en banc des nuages.

onde de Kelvin

En océanographie : onde de gravité à basse fréquence confinée par une frontière verticale (par exemple, littoral) ou par l'équateur. La marée se propage sous forme d'onde de Kelvin le long des côtes. Le phénomène El Niño est associé à une onde de Kelvin qui se propage et qui relève la thermocline dans l'ouest du bassin Pacifique et l'approfondit dans l'est.

onde planétaire / onde de Rossby

Mouvement ondulatoire de grande longueur d'onde de la circulation atmosphérique ou océanique. Les instabilités de la circulation atmosphérique liées aux inhomogénéités de la surface terrestre (alternances océans – continents, relief, différences de température et donc de pression) créent des ondes planétaires stationnaires, sinueuses, les ondes de Rossby, qui s'amplifient en vastes tourbillons et provoquent les alternances de beau temps anticyclonique et de perturbations cycloniques. Ces ondes ont pour force de rappel la force de Coriolis.

optimum

Période longue (siècle ou plus) pendant laquelle la température moyenne est plus élevée que dans les périodes précédentes et suivantes.

optimum médiéval / anomalie médiévale

Période de l'histoire, entre le X^e^ siècle et le XIV^e^ siècle, caractérisée par des chaleurs inhabituelles dans de nombreuses régions de la Terre et particulièrement le nord de l'Europe qui a connu des températures supérieures à la température actuelle. Mais les reconstructions indiquent que ces phénomènes n'étaient pas synchrones sur tout le globe : le réchauffement d'alors n'était pas global.

Voir l'encadré « **Des fluctuations naturelles du climat : l'Optimum médiéval, le Petit Âge Glaciaire** ».

orbite terrestre

Ellipse décrite par la Terre autour du Soleil en 365,26 jours. La distance moyenne de la Terre au Soleil, variable avec sa position sur l'ellipse et les caractéristiques de celle-ci (voir Milankovitch), est de 150 millions de km.

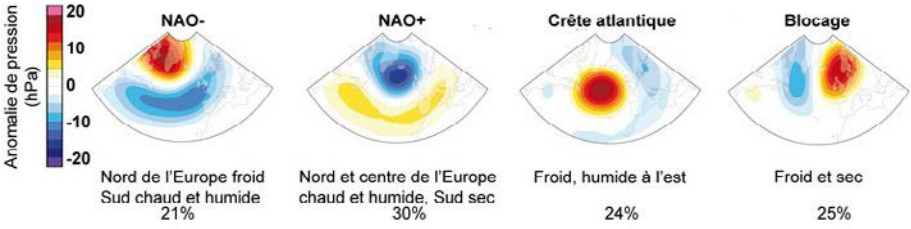
oscillation

Évolution récurrente de l'atmosphère éventuellement couplée à une évolution simultanée de l'océan, sur un bassin océanique.

- *Oscillation nord-atlantique* (NAO)

  La NAO (*North Atlantic Oscillation*) se caractérise par des variations opposées de la pression barométrique en Islande et aux Açores.

La répartition des pressions sur le bassin Atlantique nord fluctue sur des échelles de temps allant de jours à des décennies. On distingue quatre modes : NAO–, NAO+, crête Atlantique et blocage, en fonction des emplacements des anomalies de pression. La NAO pilote le temps hivernal sur l'Europe.



Les 4 modes de la NAO, avec leur fréquence relative moyenne.

- *Oscillation arctique* : caractérisée par la différence de pression entre les hautes et les moyennes latitudes, c'est une autre manifestation de l'oscillation nord-atlantique.
- *Oscillation antarctique* : dans l'hémisphère sud, oscillation similaire à l'oscillation arctique.
- *Oscillation atlantique multidécennale (AMO)* : oscillation de période longue (50 ans ou plus) sur l'Atlantique observée dans les mesures de température des eaux de surface effectuées depuis un siècle et demi, qui affecte les régimes de précipitation sur les continents des deux côtés de l'Atlantique.
- *Oscillation australe* (voir ENSO).
- *Oscillation pacifique décennale (PDO)* : oscillation décennale du Pacifique qui, imbriquée avec les El Niño, imprime une modulation basse fréquence des événements qui intéresse aussi le Pacifique nord et influe sur les températures et les précipitations dans toute l'Amérique du Nord via la téléconnexion Pacifique-Nord-Américaine.

oxyde nitreux / protoxyde d'azote / N_2O

Puissant gaz à effet de serre contribuant pour 5 % à l'effet de serre additionnel. Il se forme naturellement dans les océans et dans les sols. Les engrais utilisés dans l'agriculture intensive sont responsables des deux tiers du N_2O atmosphérique. Temps de résidence : 114 ans.

ozone / O_3

Gaz à effet de serre naturellement présent dans la stratosphère où il absorbe les rayonnements UV. L'ozone est également produit dans la troposphère par des réactions faisant intervenir, d'une part les oxydes d'azote NO et NO_2 issus de réactions à haute température entre l'oxygène et l'azote de l'air, et d'autre part les composés organiques volatils ou le monoxyde de carbone CO.

Pourquoi des mesures par satellite

L'arrivée des satellites a révolutionné l'observation de la Terre, en apportant une couverture de données plus complètes et en permettant d'observer des régions sous-échantillonnées, comme l'océan ou les régions polaires pour lesquelles il y a peu ou pas de station météorologique. On distingue fondamentalement les satellites géostationnaires et les satellites défilants.

Les satellites géostationnaires se situent à la latitude de l'équateur à 36 000 km au-dessus du sol. Ils tournent autour de la Terre à une vitesse leur permettant d'être immobiles par rapport aux points observés à la surface du globe. Leur période de rotation autour du globe est ainsi exactement la durée de la rotation de la Terre autour de son axe. Ils permettent d'observer de façon continue les points situés sur la partie de la Terre de part et d'autre de l'équateur visibles de l'espace à 36 000 km de distance. Leur visée couvre environ 42 % de la surface du globe, mais ils ne voient pas les latitudes nord ou sud supérieure à 80°. Pour avoir une bonne précision des mesures, on ne prend en compte que l'observation à des latitudes inférieures à 60° ; au-delà, la résolution est trop mauvaise.

Les satellites défilants, situés à plus basse altitude, permettent d'observer de plus hautes latitudes, ou d'avoir une meilleure définition géographique du point observé. De nombreuses observations pour le climat utilisent des satellites héliosynchrones à orbite polaire : le satellite survole tout point situé à la verticale de sa position toujours exactement à la même heure solaire. Le satellite couvre l'ensemble du globe, y compris les régions polaires. Selon le type d'instrument, la « fauchée » (la bande de sol couverte à chaque orbite par le satellite) est plus ou moins large. En fonction de cette largeur et de la latitude, un point au sol peut être vu jusqu'à 2 fois par jour aux basses latitudes et davantage quand la latitude augmente.

L'intérêt d'observer depuis l'espace est multiple. Avec des jeux de satellites appropriés, on accède à tous les points du globe, y compris ceux où il serait très difficile d'installer et d'entretenir des systèmes de mesures.

Les satellites sont porteurs d'instruments très variés pour observer la surface du globe et l'atmosphère depuis l'espace. Ils donnent ainsi accès :

- dans l'atmosphère : les mesures météorologiques, avec la température à la surface du globe et dans les couches de l'atmosphère, les nuages, l'humidité atmosphérique, les aérosols, la concentration de gaz à effet de serre… ;
- à la surface des continents : l'extension et l'état de la végétation, les feux de savane et de forêt… ;
- à la surface de l'océan : le niveau de la mer, la température des eaux de surface, la hauteur des vagues, les courants de surface, les populations de phytoplancton… ;
- pour la cryosphère : l'étendue de la banquise, l'étendue et la masse des glaciers en particulier des calottes polaires, les couvertures neigeuses.

Tout ceci n'est toutefois pas sans difficultés techniques. Les instruments sur le satellite sont sensibles à tout ce qui les atteint, que cela provienne de la surface terrestre ou de l'atmosphère. Les instruments ne peuvent pas être réparés en cas de défaillances. Indépendamment des problèmes éventuels de dérive des appareils au cours du temps, il faut soigneusement intercalibrer les instruments successifs d'observation d'une même variable environnementale pour assurer des séries de données dont les évolutions soient représentatives d'un signal climatique et non d'un problème de mesure.

Les mesures par satellites demandent donc des préparatifs très rigoureux et des traitements des données très élaborés qui font que la mise au point des missions est longue et onéreuse. Mais les services qu'elles apportent sont absolument irremplaçables.

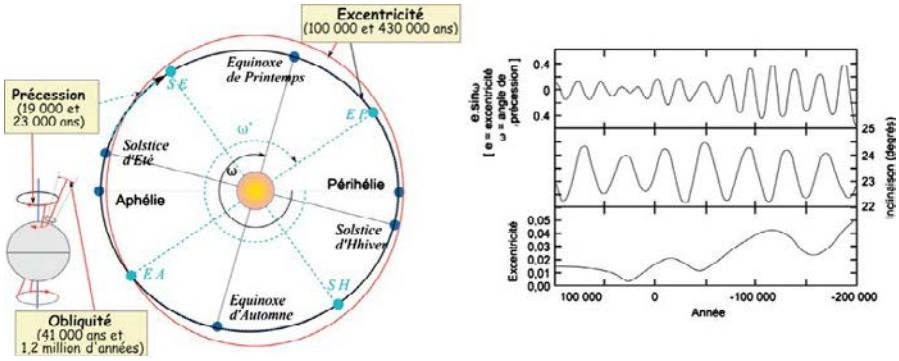
paléoclimats

Climats du passé. L'étude des paléoclimats est une source d'informations irremplaçable pour comprendre les mécanismes d'évolution du climat. Ils permettent aussi de tester les modèles dans des conditions climatiques très différentes de l'actuel.

Voir les encadrés « **Que nous apportent les paléoclimats ?** », « **Reconstruction des paléoclimats : proxies et datations** » et « **Des fluctuations naturelles du climat : l'Optimum médiéval, le Petit Âge Glaciaire** ».

paramètres orbitaux

Soumise à l'attraction du Soleil mais aussi des autres planètes du système solaire, la Terre voit les caractéristiques de son orbite fluctuer. L'excentricité de l'orbite fluctue avec une pseudo-périodicité de 100 000 et 400 000 ans ; un mouvement de précession décale la position des saisons sur l'orbite terrestre (« précession des équinoxes ») avec des périodicités de 19 et 23 000 ans ; l'axe d'inclinaison de la Terre (obliquité) par rapport au plan de son orbite fluctue avec des périodicités d'environ 40 000 ans, mais aussi 1,2 million d'années.



Ces variations de l'orbite terrestre modulent la répartition de l'énergie solaire incidente en fonction des saisons et des latitudes, ce qui est le facteur déclenchant des glaciations.

paramétrisation

De nombreux processus agissant à une échelle inférieure à celles de la maille ou du pas de temps du modèle ne peuvent pas être représentés de façon explicite : processus faisant intervenir les nuages, diffusion turbulente, échanges de carbone entre l'air et les feuilles… Leur effet est modélisé avec des paramètres empiriques (d'où le nom de paramétrisation) sur la base des lois physiques.

particule

Portion de matière individualisée de taille sub-millimétrique.

Les particules, constituants des aérosols, interviennent dans la diffusion de la lumière et comme noyaux de condensation des nuages.

pergélisol (en anglais : *permafrost*)

Sol dont la température se maintient en dessous de 0 °C pendant plus de deux ans consécutifs.

Le pergélisol occupe 20 % de la surface continentale sur Terre, essentiellement dans les hautes latitudes (> 60°) de l'hémisphère nord. Son épaisseur peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Il contient une quantité importante de carbone organique susceptible de se répandre dans l'atmosphère en cas de dégel, et des quantités considérables et mal connues de méthane sous forme de clathrates.

perturbation anthropique

Modification apportée à l'environnement par les activités humaines, et qui est susceptible d'altérer le fonctionnement naturel du système Terre. Les émissions de gaz à effet de serre, les émissions de particules, les modifications de la couverture végétale causées par l'homme sont des perturbations anthropiques.

perturbation externe

Modification de l'environnement d'origine extérieure au climat, et qui est susceptible d'altérer le fonctionnement de la machine climatique. Exemple : éruption volcanique, variation de l'activité solaire…

perturbation radiative

Création d'un déséquilibre entre l'énergie reçue par la Terre et l'énergie qui part dans l'espace.

Petit Âge glaciaire

Période allant du XIV^e^ siècle au milieu du XIX^e^ siècle, pendant laquelle la Terre a connu des hivers froids bien documentés en Europe et en Amérique du Nord, et une progression générale des glaciers alpins.

Si les hivers permettaient souvent le patinage sur les rivières et les canaux (sujet chéri des peintres flamands), la période n'en a pas moins connu des étés torrides.

Ces deux tableaux de Brueghel montrent le contraste entre l'hiver glacial et l'été brûlant à cette époque en 1565.

Voir l'encadré « **Des fluctuations naturelles du climat : l'Optimum médiéval, le Petit Âge Glaciaire** ».

phénologie des êtres vivants

Étude de l'apparition d'événements périodiques de leur vie liés aux variations saisonnières du climat. Exemples : phases du cycle végétatif, migrations des oiseaux…

phénomène sous-maille

En modélisation du climat, phénomène dont des dimensions caractéristiques spatiales ou temporelles sont inférieures à celles de la maille du modèle (voir paramétrisation).

Que nous apportent les paléoclimats ?

Les activités humaines perturbent le climat. Plus on injecte de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus les changements climatiques sont prononcés. Les mesures météorologiques systématiques à l'échelle mondiale n'ont commencé qu'il y a un siècle et demi. Elles ne couvrent qu'une gamme relativement restreinte de variations climatiques. Il y a de bonnes évidences que la Terre a connu des variations importantes de son climat par le passé, les grandes glaciations en sont un exemple. Ces grandes variations climatiques offrent de nombreux exemples permettant de mieux comprendre comment le climat réagit à différentes perturbations. Ils permettent d'anticiper un climat futur sensiblement différent des conditions actuelles. La connaissance des paléoclimats permet aussi de tester les outils numériques (modèles de climat) qui sont utilisés pour explorer le climat futur suivant de possibles évolutions de l'activité humaine.

La reconstruction des paléoclimats est décrite dans l'encadré « Reconstruction des paléoclimats : proxies et datations ». Au cours des cycles glaciaires-interglaciaires, le climat a connu de nombreuses variations dont certaines très rapides et qui, soit affectaient simultanément l'ensemble du globe, soit fonctionnaient en bascule, c'est-à-dire que les deux hémisphères nord et sud évoluaient en sens opposé : réchauffement de l'un concomitant avec refroidissement de l'autre. Ces enseignements sont issus des différents relevés et mesures, et de l'établissement de leurs variations relatives grâce à des cadres chronologiques de plus en plus précis. Ils nous interpellent sur l'amplitude de la perturbation induite par l'activité humaine, sa vitesse et différents seuils pouvant conduire à des événements abrupts liés à la fonte des calottes ou au fonctionnement des écosystèmes.

La théorie et les expériences numériques à l'aide d'une hiérarchie de modèles permettent de s'interroger sur les amplitudes de ces variations passées et les facteurs les ayant engendrées, qu'ils soient liés à l'orbite terrestre autour du Soleil, à la composition de l'atmosphère, au couvert végétal, aux surfaces englacées ou à des variabilités internes propres aux différents milieux qui façonnent le climat. À l'aide de modèles simples qui décrivent seulement les principaux facteurs permettant de caractériser les grands changements de températures et les principales interactions entre l'atmosphère, l'océan, la glace ou la végétation, il est possible de simuler les variations glaciaires interglaciaires. Avec de tels modèles, il est possible de faire un grand nombre de simulations pour étudier par exemple comment les variations lentes des paramètres orbitaux qui modulent le rayonnement solaire se combinent avec le cycle du carbone et la construction ou la fonte des calottes de glace pour produire la diversité des climats glaciaires et interglaciaires du quaternaire. Les simulations avec les modèles de circulation générale de climat permettent une meilleure représentation régionale et une caractérisation plus fine des processus. Cependant elles sont très coûteuses en temps de calcul du fait du nombre élevé de processus en jeu et du grand nombre de mailles du modèle. Il est exclu d'utiliser de tels modèles pour tester plusieurs cycles glaciaires interglaciaires. Ils permettent en revanche de mieux caractériser

les différentes échelles de variabilité et les changements météorologiques dans un climat différent.

Bien que basés sur des équations censées être universelles, les modèles sont ajustés pour reproduire au mieux le climat actuel. Cela est nécessaire mais ne garantit absolument pas qu'ils soient capables de calculer correctement le climat dans des conditions environnementales différentes de la situation actuelle, alors que c'est précisément ce qu'on attend d'eux. Les paléoclimats jouent là un rôle essentiel en permettant d'évaluer, et non plus ajuster, les modèles, en confrontant les résultats de simulations des climats passés très différents de l'actuel aux reconstructions réalisées à partir des nombreuses archives paléoclimatiques.

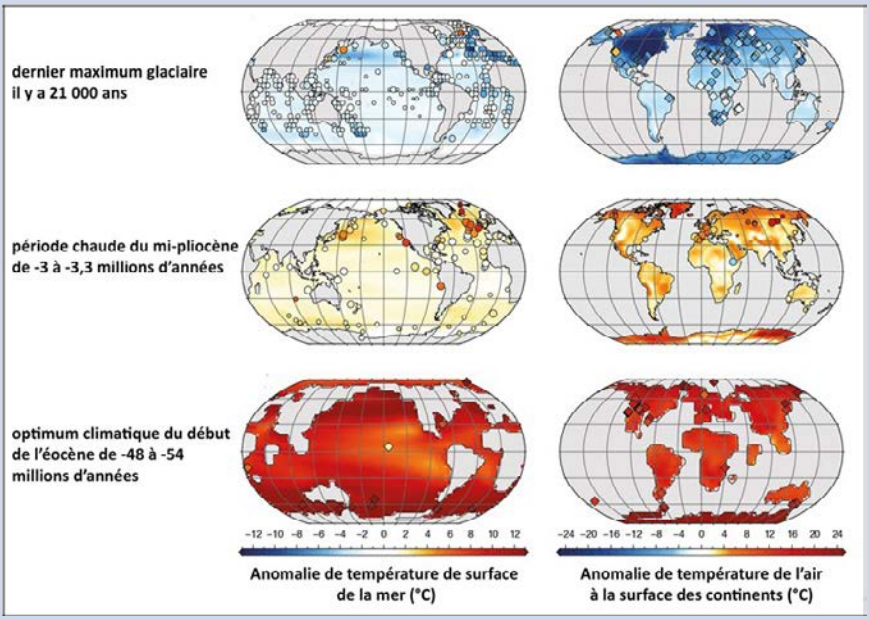


Figure 14-1. Reconstruction des températures à la surface du globe pour trois époques où la Terre a connu des climats très différents de l'actuel. À gauche : température des eaux de surface des océans. À droite : température de l'air au voisinage du sol. Les ronds sont les données issues des proxies. Leur taille reflète la confiance qu'on a dans ces valeurs. Ces figures mettent clairement en évidence que les changements de température sont amplifiés aux hautes latitudes. (Source GIEC AR5)

photosynthèse

Processus de transformation de carbone minéral (CO_2) en carbone organique (cellulose…) dans les végétaux et dans des organismes aquatiques (phytoplancton) sous l'action du rayonnement solaire. Ce processus joue un rôle fondamental dans l'élimination du CO_2 atmosphérique.

phytoplancton

Micro-organismes aquatiques chlorophyllés, qui consomment le CO_2 par photosynthèse. Le développement du phytoplancton requiert aussi d'autres nutriments (nitrates, phosphates) et la présence de traces d'éléments comme le fer.

piégeage du carbone

Processus augmentant la teneur en carbone d'un réservoir autre que l'atmosphère. Ce sont par exemple l'extraction biologique du carbone atmosphérique par le reboisement ou par des pratiques agricoles qui accroissent le carbone stocké dans les sols ; c'est aussi l'élimination du CO_2 des fumées associé à son stockage géologique.

Pierre-Simon Laplace

Pierre-Simon (de) Laplace (1749-1827). Figure scientifique majeure : mathématicien, astronome et homme politique français. Son nom a été donné à la fédération de laboratoires IPSL.

plate-forme de glace

Prolongation d'un inlandsis au-delà de la côte du continent. À ne pas confondre avec la glace de mer. Voir cryosphère.

pluviométrie

Mesure de l'ensemble des précipitations : pluie, grêle ou neige, sur une aire géographique donnée pendant une période donnée. Si on se limite à la pluie, on parle aussi de pluviosité.

pouvoir de réchauffement global (PRG)

Pour un gaz donné, facteur par lequel il faudrait multiplier le réchauffement produit par du CO_2 pour obtenir le réchauffement produit par la même masse du gaz considéré au bout d'un temps donné (100 ans quand on ne le précise pas).

La valeur du PRG dépend de l'échéance à cause du temps de résidence et du devenir du gaz dans l'atmosphère.

Gaz	Temps de résidence (ans)	PRG à 20 ans	PRG à 100 ans
Dioxyde de carbone : **CO_2**	>> 1 siècle	1	1
Méthane : **CH_4**	12	72	25
Oxyde nitreux : **N_2O**	114	289	298
CFC-115 : **$CClF_2CF_3$**	1 700	5 310	7 370
Tétrachlorure de carbone : **CCl_4**	26	2 700	1 400
HCFC-22 : **$CHClF_2$**	12	5 160	1 810
HFC-23 : **CHF_3**	270	12 000	14 800
Hexafluorure de soufre : **SF_6**	3 200	16 300	22 800

Temps de résidence et PRG de divers gaz à effet de serre produits par l'homme.

Reconstruction des paléoclimats : proxies et datations

Le climat de la Terre n'a pas toujours été ce qu'il est à l'époque actuelle. Au cours de l'histoire de la Terre, il a connu de nombreuses variations. Les enregistrements météorologiques à l'échelle mondiale ont au plus un siècle et demi. Pour reconstituer les climats passés, il faut collecter dans l'environnement des échantillons dont certaines caractéristiques ont été marquées par le climat, et dont l'état de conservation permette de retrouver ces caractéristiques. Il est alors possible d'en déduire les conditions climatiques qui régnaient à l'époque où ces échantillons ont été marqués, époque qu'il faut donc aussi savoir dater.

Le développement des êtres vivants, animaux comme végétaux, est conditionné par les caractéristiques du milieu ambiant, qui affectent leur croissance, impriment leurs marques dans la composition chimique de certaines parties des organismes. Quelques exemples :

- la composition isotopique de l'oxygène des coquillages et exosquelettes des foraminifères dépend de la composition isotopique de l'eau de mer, mais aussi de la température et de la salinité de cette eau ;
- la croissance annuelle des arbres, quantifiable par l'épaisseur des cernes, dépend de la ressource en eau et de la température de l'année ;
- les coraux se développant au voisinage de la surface voient leur croissance impactée par le niveau de la mer ;
- chaque organisme ne se développant que dans certaines conditions climatiques, le type de population reflète le climat ;
- de même, les glaces polaires gardent des traces des climats du passé.

En collectant et en analysant ces archives du passé, on peut donc avoir accès à des caractéristiques du climat de l'époque où elles ont été formées.

Les restes fossilisés utilisables des divers organismes se retrouvent dans des milieux naturels si ceux-ci les ont préservés de l'altération. De tels milieux sont par exemple des sédiments marins ou lacustres, des tourbes. Les squelettes des coraux, les concrétions des cavités des zones karstiques sont d'autres sources de matériaux où trouver des informations sur les climats du passé. Enfin, les glaces pérennes sont comme il est indiqué dans « Les glaces, témoins des climats anciens », des sources inestimables d'informations sur ces paléoclimats.

Les échantillons prélevés doivent être mesurés, les résultats de ces mesures analysés.

Dans le cas de restes fossilisés, un premier type de travail consiste à identifier l'espèce vivante à l'origine du fossile. Ainsi, dans les sédiments, reconnaître les espèces dont il reste les coquilles ou les tests, savoir si ce sont des espèces plutôt de surface ou de fond. Les différentes espèces prospérant dans des conditions climatiques différentes apportent une information sur celles qui régnaient lorsque ces espèces vivaient à l'endroit étudié. La caractérisation des pollens donne le même type d'information pour le milieu continental.

Pour toutes les mesures nécessitant des séparations isotopiques, on a recours à la spectrométrie de masse. Ceci est vrai aussi bien pour les organismes aquatiques que pour les concrétions calcaires et les carottes de glace.

Les résultats de ces mesures et analyses sont qualifiés de proxies (pluriel de l'anglais *proxy*). Ce vocable englobe des choses aussi variées que des spéciations, des dosages isotopiques, qu'il faut ensuite convertir en paramètres climatiques. Comme on l'a vu dans « Les glaces, témoins des climats anciens », le rapport des teneurs en oxygène peut être converti en température de formation de la neige et donc de la glace. Mais pour beaucoup d'échantillons, les données extraites des mesures dépendent non pas d'un seul mais de plusieurs des paramètres du climat qu'on essaie de reconstituer. Il faut donc combiner différentes mesures pour obtenir les valeurs recherchées.

Pour avoir une vision cohérente de l'évolution du climat, il est nécessaire de savoir non seulement à quelle période l'échantillon analysé a été marqué par le climat, mais aussi d'avoir accès à une chronologie. L'intérêt des dépôts par couches est que, au fur et à mesure qu'on s'enfonce dans le milieu, en partant de la surface, on accède à des époques de plus en plus anciennes si on est sûr que les couches n'ont pas été mélangées *in situ* par exemple par des courants marins ou des organismes fouisseurs. En analysant les tranches du milieu, on lit alors les caractéristiques des époques successives comme on effeuille les pages d'un livre. De tels dépôts en couches se trouvent dans les sédiments marins ou lacustres, dans les glaciers pérennes, mais aussi dans les concrétions des cavités naturelles, dans les coraux ou dans les cernes des arbres.

Figure 15-1. Quelques exemples d'archives climatiques.

Datations

Les méthodes de datation sont variées et nous n'en évoquerons que quelques-unes.

Les éléments radioactifs : un élément radioactif se transforme spontanément en un autre élément, son descendant, en émettant un rayonnement. Cette décroissance radioactive est caractérisée par une période qui correspond au temps pour lequel la moitié des atomes du corps présents à l'instant initial se sont transformés en atomes de son descendant. Si on connaît la concentration de l'élément de départ en fonction du temps, la concentration résiduelle au moment de la mesure donne accès à l'âge de l'échantillon. C'est le cas des datations au carbone 14. La période de décroissance du carbone 14 est de 5 730 ans, ce qui interdit de l'utiliser pour dater des échantillons âgés de plus de 50 000 ans. On remonte à des époques beaucoup plus anciennes avec le couple uranium-thorium. L'uranium est soluble dans l'eau et se trouve à l'état de trace dans toutes les eaux, alors que son descendant, le thorium, est insoluble et ne s'y trouve pas. Le rapport des concentrations d'uranium et de thorium dans l'échantillon donne donc le temps qui s'est écoulé depuis la formation de l'échantillon en présence du milieu aqueux. Les divers couples de radio-éléments permettent de dater des échantillons dans des gammes d'âges très variées.

Il est assez aisé de compter les couches annuelles des végétaux (cernes des arbres), du calcaire des coraux, des stalactites et stalagmites (sauf les années très sèches) et de certains sédiments. La datation de la glace extraite dans les carottages se fait aussi, quand les conditions s'y prêtent, par les couches annuelles, ou par d'autres méthodes (voir l'encadré « Les glaces, témoins des climats anciens »).

Mais toutes ces méthodes donnent l'âge des échantillons avec une certaine incertitude, qui rend difficile la corrélation temporelle des événements en deux points éloignés du globe (Groenland et Antarctique par exemple), une information nécessaire pour comprendre les mécanismes du climat à l'échelle globale. Pour réaliser la synchronisation des observations entre les deux pôles par exemple, une possibilité est de raccorder les résultats des mesures en utilisant la concentration de certains gaz comme le méthane dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces : la concentration du méthane s'uniformise dans l'atmosphère en quelques mois.

Une synchronisation des événements observés avec l'activité solaire est aussi mise en œuvre, en particulier pour les carottes de glace, par le dosage des isotopes cosmogéniques qui se sont déposés dans la neige.

ppm ; ppb

ppm = partie par million ; ppb = partie par milliard (*part per billion* en anglais). Pour l'atmosphère, ce sont des quantités en volume (on écrit souvent ppmv), ou ce qui est équivalent, en nombre de molécules. Une concentration de CO_2 de 400 ppm, c'est 400 molécules de CO_2 pour 1 million de molécules d'air, ou 400 cm^3 de CO_2 pour 1 m^3 d'air.

prairie et gaz à effet de serre

Une prairie accumule du carbone dans la matière végétale et la matière organique du sol (0,7 à 1 t/ha/an dans le Puy-de-Dôme) et émet du méthane (ruminants), de l'oxyde nitreux (sols agricoles et effluents d'élevage). Le résultat net est un puits de gaz à effet de serre, plus efficace en exploitation extensive qu'en exploitation intensive.

précession

L'axe de rotation de la Terre décrit un cône d'axe perpendiculaire au plan de l'orbite, avec une période apparente de 19 000 et 23 000 ans. Ceci décale la position des saisons sur l'ellipse de l'orbite. En modulant la saisonnalité, la précession joue un rôle important dans les glaciations (voir Milankovitch) quand l'excentricité de l'orbite n'est pas trop faible.

précipitations

L'eau qui tombe des nuages sous forme liquide (pluie) ou solide (grêle ou neige). Une partie des précipitations s'évapore avant d'atteindre le sol.

précurseur

Corps chimiquement actif qui intervient dans la formation du corps dont il est le précurseur. Le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote sont des précurseurs de l'ozone. Le sulfure de diméthyle est un précurseur d'aérosols de sulfates.

préindustriel

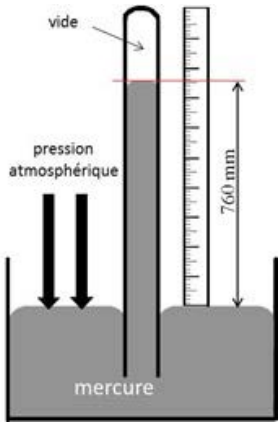
Relatif à la période qui a précédé l'ère industrielle, que l'on considère généralement comme débutant vers 1750.

prescrire

Dans un modèle numérique de climat, des variables environnementales sont dites prescrites si leurs valeurs sont imposées en entrée du calcul et non déterminées par le modèle au cours de son calcul.

pression atmosphérique / pression barométrique

Pression qu'exerce le mélange gazeux de l'atmosphère sur une surface au contact de l'atmosphère. Elle s'exprime en pascals. La pression moyenne au niveau de la mer à 45° de latitude nord est de 1 013,25 hectopascals (on disait précédemment millibars). Anciennement, on l'exprimait en hauteur de la colonne de mercure du baromètre de Torricelli : 760 mm.



Baromètre de Torricelli.

Voir aussi approximation hydrostatique.

prévisibilité

Mesure de la durée (heures, jours…) au-delà de laquelle la prévision obtenue à partir d'un modèle prévisionnel n'est plus fiable. Pour la météorologie, elle est liée au caractère chaotique du temps, aux incertitudes des mesures et du modèle. Pour une prévision météorologique précise, la prévisibilité est d'environ 3 jours (*source Météo-France*).

prévision climatique et prévision météorologique

Les modèles de météo et de climat sont très voisins. La météorologie ne s'intéresse qu'au court terme à cause du caractère chaotique de l'évolution du temps ; elle ignore les processus lents et se concentre essentiellement sur l'atmosphère. Ceci lui permet de travailler avec une résolution spatiale (maille de 8 km) et temporelle élevée. Les modèles de climat doivent prendre en compte tous les processus sur une période longue, ce qui nécessite de réduire la résolution (maille de 100 km) pour avoir des temps de calculs à la mesure des capacités des ordinateurs.

Pour le long terme, le modèle climatique balaye l'ensemble des états météorologiques accessibles avec les conditions aux limites imposées : rayonnement solaire, surface continentale, composition atmosphérique…

processus turbulent

Voir turbulence.

production primaire brute ; production primaire nette

Quantité de carbone minéral transformé en carbone organique par photosynthèse. La production primaire nette est l'augmentation de biomasse correspondante. La différence entre les deux est due à la respiration des plantes et à leur sénescence.

Des fluctuations naturelles du climat : l'Optimum médiéval, le Petit Âge Glaciaire

Deux périodes qui se sont produites à un moment où le fonctionnement du climat est proche du fonctionnement actuel sont souvent citées comme des exemples de variation naturelle du climat ayant eu un large impact sur la société. Il s'agit de l'Optimum médiéval autour de l'an mille et du Petit Âge glaciaire de la moitié du XVI^{e} siècle à la moitié du XIX^{e} siècle. Nous allons voir ce qu'il en est exactement.

L'Optimum médiéval

De nombreuses indications montrent que, durant la période allant du X^{e} au XIII^{e} ou XIV^{e} siècle, de nombreuses régions du globe ont connu des épisodes plus chauds que durant les siècles antérieurs et postérieurs. On a baptisé cette période de quatre à cinq siècles l'Optimum médiéval. Du fait de l'occurrence d'épisodes chauds en de nombreux sites du globe, certains prétendent qu'il s'agirait d'un réchauffement global comme celui que nous connaissons depuis un siècle et demi. En fait, ces affirmations se révèlent inexactes et de nombreuses études permettent de dire que :

– les épisodes chauds n'ont pas été concomitants dans les divers sites où on a pu les reconstituer ;
– si, par rapport au début du XX^{e} siècle, il y a effectivement eu des régions plus chaudes, il y en a aussi eu de plus froides comme le Pacifique tropical ; Il y a même eu des régions qui se sont refroidies pendant l'Optimum médiéval.

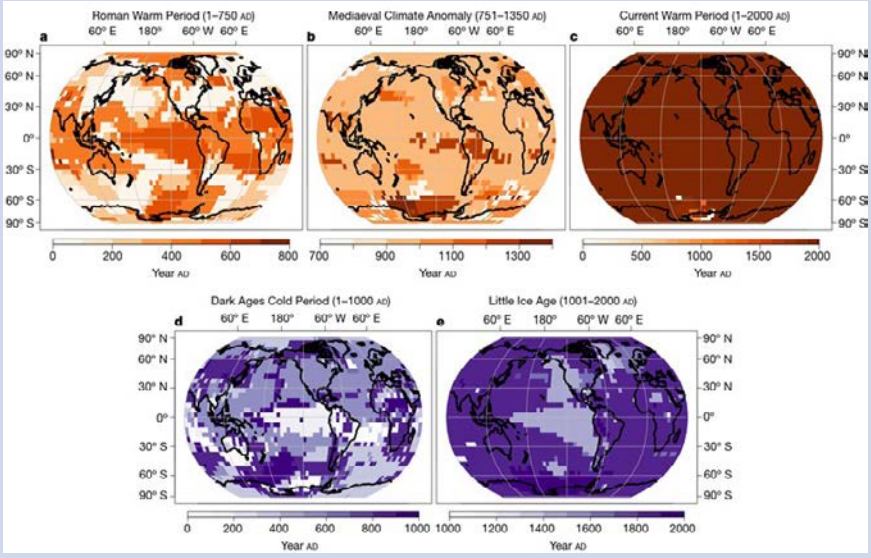


Figure 16-1. Dates des épisodes chauds (en haut) et froids (en bas) aux différents points de la Terre. La période actuelle est la seule où l'évolution de la température intéresse toutes les régions du globe simultanément. (Source : Neukom et al., 2019, No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era, Nature)

Les températures globales ont connu un réchauffement qui serait dû conjointement à une activité plus forte du Soleil et à l'absence pendant cette période d'éruptions volcaniques importantes qui auraient obscurci le ciel. Ces facteurs externes ont également pu se combiner à la variabilité interne du climat. Noter que ceci est très différent des circonstances actuelles où l'activité solaire tend plutôt à diminuer et où les éruptions volcaniques sont relativement fréquentes.

Le réchauffement a été particulièrement marqué dans les régions de l'Atlantique nord, du fait d'une modification de la circulation océanique qui y amenait davantage d'eau chaude.

Le Petit Âge glaciaire

Du XV^e^ siècle à la moitié du XIX^e^ siècle, la survenue fréquente d'hivers rigoureux, particulièrement en Europe, a inspiré les peintres hollandais. Il existe de nombreux tableaux représentant des canaux et rivières gelés où se pratiquait le patinage sur glace. Cette période a été marquée par la progression des glaciers dans de nombreuses régions du globe.

Il faut toutefois noter que la période a été marquée par une forte variabilité météorologique saisonnière et interannuelle. En effet, s'il y avait des hivers rigoureux, il y en avait aussi de doux, et les étés n'étaient pas particulièrement frais.

Comme pour l'optimum médiéval, on doit constater que les épisodes froids n'étaient pas synchrones dans toutes les régions touchées. Des régions comme l'est de la Chine ou la Cordillère des Andes n'ont pas vu d'altération de leur climat tandis que d'autres comme le sud de l'Europe, la vallée du Mississipi et des zones d'Afrique et d'Asie ont été touchées par l'aridification avec des sécheresses durant chacune plusieurs années.

Des études permettant de se demander si une cause externe est responsable d'une fluctuation climatique observée indiquent qu'une contribution majeure au déclenchement du Petit Âge de glace est la fréquence et l'importance d'éruptions volcaniques. Les aérosols injectés dans le ciel ont bloqué une partie du rayonnement solaire, limitant l'apport de chaleur au sol pendant une ou deux années suivant l'éruption. Une recrudescence d'éruptions ne laisse pas le temps au climat de retrouver ses conditions normales. En outre, la période a été marquée par plusieurs séquences d'activité solaire réduite avec en particulier le minimum de Maunder dans la seconde moitié du XVII^e^ siècle. Notons aussi que l'oscillation nord-atlantique (NAO) a été très perturbée.

projection

Estimation grâce à des modèles climatiques, de la réponse du système climatique à un scénario de forçage radiatif ou d'émissions de gaz à effet de serre. Les projections climatiques dépendent des scénarios, eux-mêmes basés sur des hypothèses sur les futurs développements socio-économiques et technologiques.

protocole de Kyoto

Protocole adopté à la troisième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC en 1997 à Kyoto. Les pays de l'OCDE et de l'Europe de l'Est y compris la Russie, mais pas les pays émergents, ont convenu de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % en moyenne en 2012 par rapport à 1990. Ce protocole est entré en vigueur en 2005 : il devait être ratifié par au moins 55 % des pays représentant au total au moins 55 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

protocole de Montréal

Adopté à Montréal en 1987, il réglemente la consommation et la production de produits chimiques halogénés (CFC, méthylchloroforme, tétrachlorure de carbone…) destructeurs de l'ozone stratosphérique (voir trou d'ozone).

proxy

(au pluriel : proxies). En paléoclimatologie, indicateur biologique, géochimique ou sédimentaire qui a gardé l'empreinte de paramètres climatiques ou environnementaux d'une époque passée qu'il permet de reconstituer de manière empirique. Exemples : la composition isotopique des éléments, les pollens, les caractéristiques des cernes d'arbres, des coraux…

Voir aussi paléoclimats.

puits

Corps, processus, mécanisme… qui élimine un composé de l'atmosphère ou la chaleur. La végétation est l'un des puits du CO_2 qu'elle absorbe par photosynthèse. Les pôles constituent un puits de chaleur.

puits continental du CO_2

La végétation absorbe du CO_2 par photosynthèse et en émet par sa respiration y compris la décomposition de la litière et du carbone dans le sol. Puits net, la végétation absorbe en moyenne 2,6 milliards de tonnes de carbone par an. Mais cette valeur est très fluctuante en fonction des conditions climatiques : la chaleur favorise la décomposition de la litière. Si elle est accompagnée de sécheresse, le puits peut ne plus fonctionner comme en Europe en 2003.

puits océanique du CO_2

L'océan absorbe actuellement 2,5 milliards de tonnes de carbone par an, soit 26 % de nos émissions. Le CO_2 est d'autant plus soluble que la température de l'eau est plus basse ; les eaux froides dissolvent le CO_2 atmosphérique alors que les eaux chaudes en relarguent dans l'atmosphère. Le phytoplancton absorbe du CO_2 pour sa photosynthèse ; moins de 1 % du carbone ainsi transformé en matière organique va se retrouver stocké dans les sédiments au fond de l'océan. La moitié du carbone en jeu dans les réactions chimiques de formation des coquilles calcaires va se trouver sous forme de carbonate, l'autre moitié étant émise sous forme de CO_2.

radicaux libres

Sous l'action du rayonnement solaire (UV), il se forme dans l'atmosphère des espèces très réactives qui peuvent être des molécules stables comme l'ozone, mais aussi des espèces instables telles que OH, HO_2, Cl… Ces radicaux jouent un rôle important dans la chimie atmosphérique. Le radical OH est la principale espèce oxydante au sein de la troposphère.

rail des dépressions / rail des tempêtes

Désigne les zones où se trouvent le plus souvent les trajectoires des dépressions des moyennes latitudes au-dessus des grands bassins océaniques (Atlantique et Pacifique). Ces rails suivent approximativement les courants-jets. En hiver, les systèmes dépressionnaires suivent le rail à raison d'un toutes les 24 ou 36 heures.

rayonnement infrarouge thermique

Rayonnement émis par la surface terrestre et l'atmosphère. Il se situe dans un domaine de longueurs d'onde plus grandes que le rayonnement solaire. Le rayonnement infrarouge thermique qui s'échappe vers l'espace assure l'équilibre du bilan radiatif terrestre.

rayonnement solaire ; UV ; visible ; proche IR

Rayonnement électromagnétique émis par le Soleil. Avec 1 % de son spectre dans l'ultraviolet et le reste à peu près à égalité entre le visible et l'infrarouge, il correspond assez bien à un rayonnement de corps noir à 5 800 K, avec une gamme de longueurs d'onde allant de 250 nm dans l'ultraviolet lointain à 2 500 nm dans le proche infrarouge. Son maximum est à 504 nm dans le vert.

RCP

Representative Concentration Pathways, les RCP sont quatre scénarios d'évolution de la perturbation radiative induite par l'activité humaine. On en déduit les trajectoires des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre compatibles au cours du XXIe siècle.

réchauffement global

Accroissement des températures moyennées sur l'ensemble de la surface du globe. Le réchauffement est global puisqu'il intéresse l'ensemble du globe, mais il n'est pas uniforme (voir amplification polaire).

renouvelable

Qualifie une source d'énergie provenant d'une source qui ne s'épuise pas dans le temps : toutes les formes d'énergie provenant du Soleil (éolienne, solaire photovoltaïque, solaire thermodynamique, biomasse, hydraulique, géothermie de surface), l'énergie des marées, la géothermie de surface. Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement une énergie disponible à la demande (problèmes d'intermittence et de flux).

réponse climatique transitoire

Comportement du climat au cours d'une période durant laquelle le climat est hors équilibre suite à une perturbation externe.

réseau de mesure

Ensemble de stations de mesure d'un ou plusieurs paramètres (exemples : données météorologiques, composition de l'air, aérosols…), réparties sur une plus ou moins grande portion du globe, et utilisant les mêmes appareillages.

réseau météorologique mondial de mesure

Réseau global de mesure des paramètres météorologiques. Il comprend des stations au sol, des sites d'observation, des bouées automatiques, un ensemble de satellites géostationnaires ou défilants.

réserves

Quantité d'une matière première géologique (exemple : un combustible fossile) que l'on sait pouvoir exploiter dans des conditions technologiques et économiques données. Ne pas confondre avec la ressource qui est la quantité totale existante (difficile à évaluer), indépendamment du fait de savoir si elle est exploitable ou non.

résilience

Formellement : capacité d'un corps, un organisme, une organisation… à réagir à une perturbation de façon à ne pas en être outrageusement incommodé.

respiration de la végétation

Ce terme regroupe deux processus d'émission de dioxyde de carbone par la végétation :

– les végétaux, pour leur métabolisme, consomment de l'oxygène et rejettent du CO_2 ;
– les débris des végétaux accumulés sur le sol (la litière) se décomposent sous l'action des micro-organismes avec émission de CO_2 (et de méthane en conditions anoxiques).

rétroaction climatique

Action en retour sur le climat d'un élément perturbé par le climat… Elle peut être positive si elle renforce l'altération initiale, négative si elle la réduit.

Les rétroactions jouent un rôle majeur dans les glaciations : avec le refroidissement, le sol des hautes latitudes reste enneigé en été donc très réfléchissant pour le rayonnement solaire. Cela inhibe le réchauffement estival et renforce donc le refroidissement. Le stockage accru du CO_2 par l'océan diminue l'effet de serre, renforçant encore le refroidissement. Ce sont des rétroactions positives.

L'émission de corps noir est une rétroaction négative : un corps chauffé émet davantage de rayonnement infrarouge, ce qui le refroidit.

révolution industrielle

Période de croissance industrielle rapide, rendue possible par le développement du moteur à vapeur. Elle a débuté en Angleterre dans la deuxième moitié du XVIII[e] siècle. Elle est marquée par un accroissement majeur de l'utilisation des combustibles fossiles, et donc des émissions de CO_2. En climatologie, on fait démarrer l'ère industrielle en 1750.

risque climatique

Quand un aléa climatique menace une population qui lui est exposée et qui est vulnérable à ses conséquences, il y a risque climatique.

Un risque climatique est défini par l'interaction de trois composantes : l'aléa climatique, l'exposition des populations, milieux et activités à cet aléa, et la vulnérabilité. L'impact est la conséquence du risque climatique.

La sécheresse et le manque d'approvisionnement en eau, la montée du niveau des mers, les modifications de la flore et la faune… constituent des risques climatiques pour les populations qui en pâtiront.

rugosité

Caractérisation de l'état de surface vis-à-vis de la turbulence. Une surface qui n'est pas lisse perturbe l'écoulement de l'air et crée des turbulences au sein de la couche de mélange. La végétation a une structure inhomogène, sa rugosité la fait interagir avec le vent, renforçant son évapotranspiration. Le remplacement de la forêt par des cultures diminue la rugosité, ce qui se traduit par des vents plus rapides au voisinage du sol.

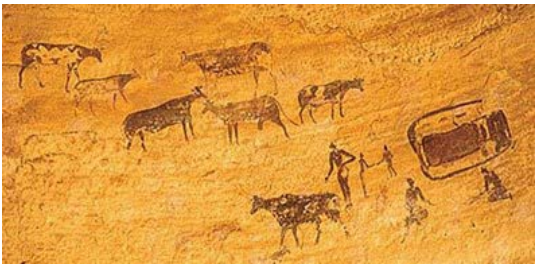
ruissellement / infiltration

Le ruissellement correspond à la partie des précipitations continentales qui ne sont pas reévaporées. Pour l'eau qui pénètre dans le sol, on parle d'infiltration. Pour celle qui s'écoule sans pénétrer dans le sol, on parle de ruissellement de surface.

Voir aussi cycle de l'eau.

Sahara vert

Un désert actuel peut ne pas avoir toujours été un désert : dans le Sahara plus humide, il y a 6 000 ans, grâce à une mousson africaine pénétrant plus à l'intérieur des terres, les populations pratiquaient l'élevage et la pêche (cf. les gravures rupestres du Tassili) : c'était l'époque du Sahara vert.



salinisation

Accumulation de sels dans les sols.

salinité

Quantité de sels dissouts dans l'eau.

L'eau des océans contient en moyenne 35 g/kg de sels (essentiellement du chlorure de sodium), avec un pH de 8,2 (légèrement alcalin), mais qui tend à diminuer en dissolvant le CO_2 en excès dans l'air. La salinité de la mer Morte, beaucoup plus forte, fait qu'on y flotte sans effort ; la mer Baltique, beaucoup moins salée, gèle plus facilement.

satellite

Voir observation par satellite.

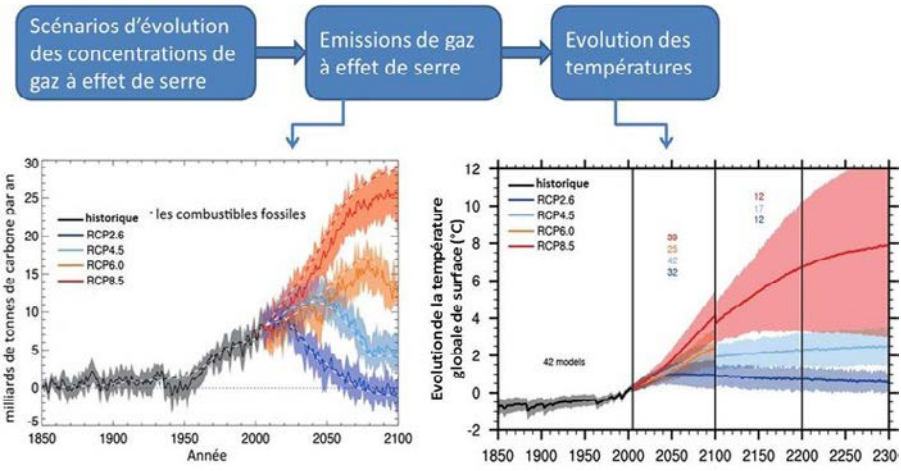
savane

Zone d'une région chaude à longue saison sèche, où la végétation, largement dominée par les graminées, peut aussi comprendre de rares arbres ou arbustes.

scénario

Caractérisation de l'évolution possible de facteurs qui vont conditionner le climat.

Pour étudier comment le climat risque d'évoluer avec l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il faut fournir au modèle de climat un scénario d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre qui vont agir sur le climat. On a donc construit divers scénarios plausibles de cette évolution.



Les scénarios RCP sont étiquetés par le forçage radiatif (en W · m^{-2}) auquel ils aboutissent en 2100.

Voir l'encadré « **Scénarios** ».

sécheresse

Phénomène lié à un déficit anormal de précipitations, qui entraîne des déséquilibres hydrologiques importants à l'origine de problèmes pour les populations (ressource en eau potable, agriculture…).

sédimentation

Accumulation de matériaux qui forment les sédiments sur le fond des océans, lacs, rivières.

sédiments

Matériaux déposés au cours du temps sur le fond des surfaces recouvertes d'eau. Ces matériaux sont une source inestimable d'informations climatiques, hydrologiques, environnementales… sur l'époque à laquelle ils se sont déposés.

sensibilité climatique

Voir doublement du CO_2 et Charney.

L'augmentation de température pour un doublement de la concentration atmosphérique du CO_2 est la sensibilité climatique. Cette sensibilité climatique varie ente 1 et 4,5 °C selon les méthodes et approximations utilisées dans les modèles.

séquestration

La séquestration (ou piégeage) du CO_2 est son stockage à long terme hors de l'atmosphère.

Les puits de carbone le séquestrent pour un temps plus ou moins long : de l'année au siècle pour la végétation, du siècle au millénaire dans l'océan, des temps géologiques pour les roches carbonatées.

services des écosystèmes

Processus ou fonctions écologiques ayant une valeur pour les individus ou la société. La forêt rend le service d'absorption d'une part appréciable de nos émissions de CO_2.

seuil

Valeur dont le franchissement confère au système un comportement différent de celui qu'il avait auparavant.

À 0 °C, l'eau douce change de phase physique. Cela entraîne une variation considérable de son albédo, avec des conséquences sur les bilans radiatifs et, de là, sur le climat.

SF_6 / hexafluorure de soufre

Gaz industriel utilisé en électrotechnique à cause de ses propriétés isolantes. C'est un puissant gaz à effet de serre, 22 800 fois plus actif que le CO_2, avec un temps de résidence atmosphérique de 3 200 ans.

Scénarios

Du point de vue de la modélisation du climat, s'interroger sur le climat futur revient à tester la réponse des modèles aux perturbations apportées à l'environnement par les émissions de gaz à effet de serre, les aérosols d'origine anthropique, l'utilisation des terres (déforestation/afforestation, agriculture, etc.). Ces perturbations environnementales engendrent une perturbation de l'équilibre énergétique du climat en modifiant le bilan radiatif. C'est l'amplitude de cette perturbation qui est responsable de l'amplitude de la réponse en température. Les noms des scénarios socio-économiques servant d'entrée aux projections climatiques sont ainsi référencés par l'amplitude de la pertubation radiative qu'ils imposent, en 2100, par rapport à la période préindustrielle. Les simulations coordonnées ayant servi de référence pour le 5e rapport du GIEC faisaient appel à quatre scénarios principaux, appelés *Radiative Concentrations Pathways* (RCP) en anglais, représentant respectivement des perturbations radiatives de 2,6 $W \cdot m^{-2}$, 4,5 $W \cdot m^{-2}$, 6 $W \cdot m^{-2}$ et 8,5 $W \cdot m^{-2}$.

Plusieurs options d'émissions et d'usage des sols sont compatibles avec ces pertubations radiatives selon les hypothèses sur l'augmentation de la population, sur la prise en compte ou non de mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre et sur les collaborations entre pays. Ces trajectoires combinant pertubations radiatives et activité socio-économique sont appelées *Shared Socio-economic Pathways* (SSP). Les SSP actuels s'appuient sur cinq descriptions différentes du monde : un monde équitable avec une croissance permettant un développement durable (SSP1) ; un monde à « mi-chemin » où les tendances continuent d'évoluer comme par le passé, avec de grands défis pour l'atténuation et l'adaptation (SSP2) ; un monde fragmenté avec des pays peu collaboratifs à tendance « nationaliste » où les rivalités régionales augmentent (SSP3) ; un monde où les inégalités ne cessent d'augmenter avec peu d'atténuation et des défis pour l'adaptation (SSP4) ; un monde en croissance rapide basé sur une forte consommation d'énergie fossile (SSP5).

La gamme de pertubations radiatives retenue est similaire à la précédente, mais permet de mieux explorer les scénarios d'amplitudes diverses, intermédaire et faible, ainsi que le rôle des composés à courte durée de vie dans l'atmosphère et de l'usage des sols. Ils explorent également différentes possibilités en termes de pic et déclin dans les émissions. Pour chaque SSP, plusieurs trajectoires d'émission de gaz à effet de serre et d'aéorols, ou d'usage des sols sont possibles. Ces trajectoires sont définies à l'aide de modèles intégrés (IAM), combinant facteurs climatiques et facteurs socio-économiques. Une seule trajectoire par SSP est retenue pour les simulations à l'aide des modèles de climat. Elle permet de prescrire en entrée du modèle de climat l'évolution de la composition de l'atmosphère (gaz à effet de serre) et en chaque point du globle l'évolution de la répartition des aérosols et des caractéristiques des surfaces continentales en termes de type de végétation, naturelle ou anthropique.

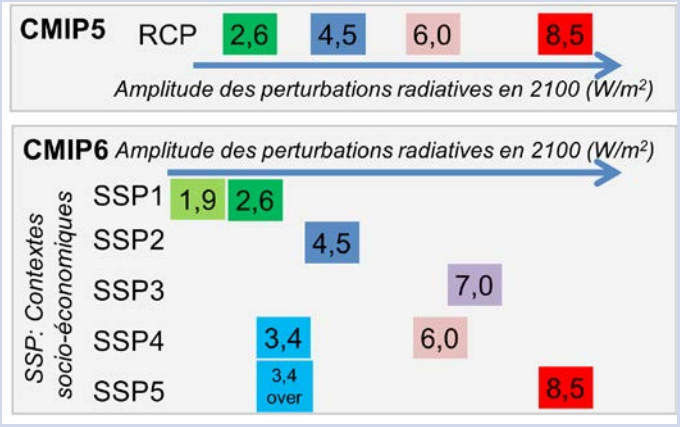


Figure 17-1. Représentation schématique des caractéristiques des scénarios RCP et SSP utilisés pour réaliser les projections climatiques futures des 5e et 6e phases du projet international de comparaison des modèles de climat (CMIP). La figure montre que quatre scénarios sont similaires en termes de perturbations radiatives, mais que les nouvelles propositions détaillent mieux le type de société conduisant à ces perturbations. Le nouvel ensemble de simulations couvre également une gamme plus complète de possibilités, permettant de mieux répondre aux questions de mitigation ou d'adaptation invoquées par l'Accord de Paris. (© CNRS-CEA-Meteo-France, O-Neill et al., 2016)

simulation climatique

Utilisation d'un modèle de climat pour calculer une trajectoire du système climatique. La simulation peut servir à élucider le rôle des divers paramètres environnementaux dans le fonctionnement d'un processus climatique. Elle sert aussi à estimer ce qui adviendra du climat dans des conditions différentes des conditions actuelles.

Pour estimer les incertitudes des simulations, on utilise des ensembles de simulations, soit réalisées dans les mêmes conditions par un jeu de modèles différent, soit effectuées avec le même modèle mais en variant légèrement les conditions.

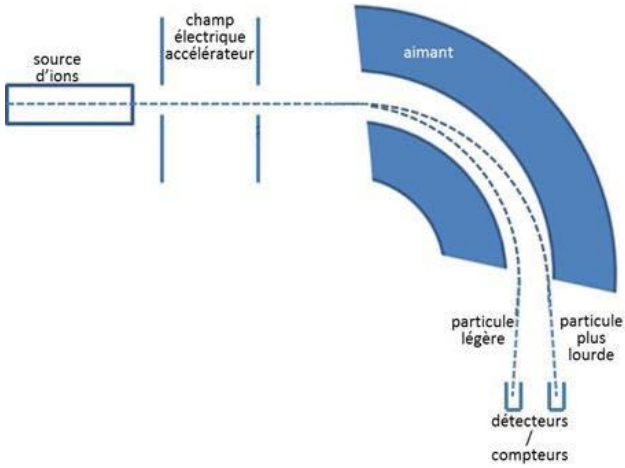
source de gaz à effet de serre

Système, activité ou mécanisme qui émet dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un de leurs précurseurs, un rayonnement ou de la chaleur.

spectromètre de masse

Appareillage destiné à séparer des ions en fonction de leur masse. Le spectromètre de masse est utilisé en particulier pour les analyses isotopiques.

Dans son principe, le corps à analyser, sous forme gazeuse, est ionisé. Les ions sont accélérés, déviés par un champ magnétique et détectés, identifiés en masse par la position de leur détection.



Dans l'aimant, les ions décrivent un arc de cercle. Plus leur masse est élevée, plus la courbure est faible.

spéléothème

Concrétion dans les cavités spéléologiques (grottes, avens). Les plus souvent utilisées sont les stalagmites dont la croissance perturbe peu la stratification. Le calcaire a enregistré les variations climatiques survenues au cours de sa formation. Le spéléothème est donc analysé couche par couche comme on le fait pour les carottes de sédiments. Chaque couche doit être datée (voir datation), car la concrétion peut ne pas avoir progressé certaines années, par exemple en cas de sécheresse.

Vue en coupe d'une stalagmite.

SR15

Special Report 1.5°. Rapport spécial sur la limitation du réchauffement à 1,5 °C, publié par le GIEC en 2018. Ce rapport, établi à la demande de la COP21, fait partie des travaux préparatoires au 6e rapport d'évaluation (AR6), dont la publication est prévue en 2022.

SRCCL

Special Report Climate Change and Land. Rapport spécial sur le réchauffement climatique et les surfaces continentales, publié par le GIEC en 2018. Ce rapport fait partie des travaux préparatoires au 6e rapport d'évaluation (AR6), dont la publication est prévue en 2022.

SROCC

Special Report on The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Rapport spécial sur l'océan et la cryosphère face au réchauffement climatique, publié par le GIEC en 2019. Ce rapport fait partie des travaux préparatoires au 6e rapport d'évaluation (AR6), dont la publication est prévue en 2022.

SSP

Les trajectoires socio-économiques partagées (en anglais : *Shared Socio-economic Pathways*) permettent de caractériser dans un cadre cohérent l'impact sur les évolutions futures des émissions de gaz à effet de serre, des émissions d'aérosols et de l'utilisation des terres, en tenant compte de différentes évolutions possibles de la société.

Voir l'encadré « **Scénarios** ».

stabilisation

Tendance du climat vers une température moyenne globale constante.

Du fait de son inertie, le système climatique met de l'ordre de 10 à 1 000 ans ou plus à atteindre sa température d'équilibre en réponse à une perturbation de l'environnement selon les réservoirs affectés par la perturbation (par exemple océan de surface ou océan de fond). Ainsi, même si on cessait aujourd'hui toute injection de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la température croîtrait encore pendant plusieurs décennies avant de se stabiliser.

stabilité verticale de l'atmosphère

Fait référence à une atmosphère dont le profil vertical de température est stable.

Une parcelle d'air moins dense que l'air ambiant est poussée vers le haut par la poussée d'Archimède. Sa pression diminue, sa température baisse par détente adiabatique et donc sa densité croît jusqu'à ce qu'elle atteigne celle de l'air environnant, ce qui stoppe la montée. De façon analogue, une parcelle d'air plus dense que l'air ambiant descend et se réchauffe jusqu'à sa situation d'équilibre avec l'air environnant.

L'atmosphère sèche est stable avec un gradient thermique de 10 °C par km.

Quand l'air est humide, l'ascension peut s'accompagner de condensation de vapeur d'eau. Ceci modifie la densité du gaz ; la chaleur ainsi libérée réchauffe le gaz. Le gradient thermique vertical s'en trouve réduit : il est de 6,5 °C par km pour un air saturé en humidité.

Ce gradient thermique vertical gouverné par les compressions et détentes adiabatiques des parcelles d'air est appelé gradient adiabatique.

Stefan-Boltzmann

La loi de Stefan-Boltzmann (du nom des physiciens Jožef Stefan et Ludwig Boltzmann) relie le flux d'énergie émis par un corps noir à la température de ce corps :

$$\Phi = \sigma \cdot T^4 \text{ en watts par } m^2 \text{ de surface}$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

stockage de carbone

Capter le CO_2 là où il est produit et le confiner dans un stockage géologique permettrait de limiter son accumulation dans l'environnement. Des sites possibles sont les aquifères salins et les anciens gisements de gaz naturel ou de pétrole. Des recherches sont en cours pour un stockage dans des basaltes en formant des carbonates par réaction du CO_2 en solution aqueuse sur la roche basique.

stratosphère ; stratopause

Deuxième couche de l'atmosphère terrestre, située entre le haut de la troposphère vers 10-20 km d'altitude et 50 km d'altitude. Elle est séparée de la mésosphère par la stratopause. Cette couche stratifiée (la température y croît avec l'altitude) n'est le siège d'aucune convection. Elle est chauffée par l'absorption du rayonnement ultraviolet par l'ozone. L'oxydation du méthane y produit de la vapeur d'eau qui contribue à l'effet de serre.

Voir aussi atmosphère.

stress hydrique

Stress que subit la végétation quand elle ne dispose pas de suffisamment d'eau.

submersion

Inondation de zones de terre ferme par suite d'une élévation du niveau de l'eau ou d'un affaissement du sol.

subsidence

Mouvement descendant de matière.

En météorologie, désigne un déplacement d'air descendant (son contraire est l'ascendance).

En géologie, désigne un affaissement progressif de l'écorce terrestre, dû par exemple à la tectonique des plaques.

suie / noir de carbone

Produit lors de combustions de composés carbonés (matière végétale, combustibles fossiles…). Les particules de suie sont un composant important des aérosols absorbants. Transportées dans les masses d'air, ces particules peuvent se déposer jusque dans les régions polaires dont elles altèrent fortement l'albédo, en noircissant la neige.

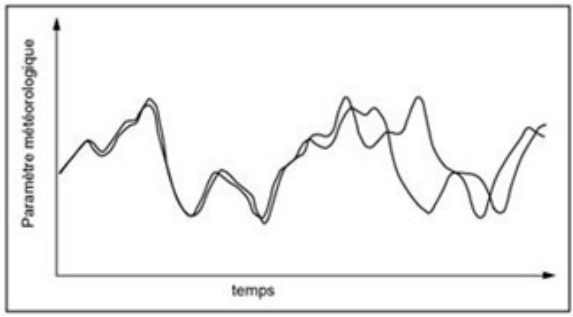
sylviculture

Développement et entretien des forêts.

La sylviculture judicieusement menée peut servir à capter une partie du carbone atmosphérique. Mais remplacer un type d'arbres par un autre type d'arbres peut aussi s'avérer moins efficace pour capturer et séquestrer le carbone.

système chaotique

Système dont le comportement dépend fortement des conditions initiales. C'est le cas de la machine climatique.



Avec deux conditions initiales très voisines, les trajectoires se séparent pour devenir rapidement complètement différentes. D'où la question de Lorenz (météorologue au MIT) : « Le battement des ailes d'un papillon au Brésil déclenche-t-il une tornade au Texas ? ».

tapis roulant de la circulation océanique

Voir circulation thermohaline.

taxe carbone

Taxe sur les émissions de dioxyde de carbone visant à réduire les émissions en leur donnant un coût. Elle peut être appliquée directement dans le pays émetteur, ou sur les produits dont la fabrication a entraîné des émissions, à l'entrée dans le pays importateur. Une augmentation progressive et programmée d'une telle taxe aide à guider les investissements sur le long terme.

téléconnexion

Action d'un phénomène climatique localisé, sur le climat d'autres régions très éloignées.

Un El Niño se produit dans le Pacifique équatorial. Par ses impacts sur la circulation atmosphérique à grande échelle, il peut avoir des conséquences notables sur une grande partie du globe. Un événement El Niño a des effets par téléconnexion loin du Pacifique équatorial.

télédétection

Mesure effectuée à distance de l'objet à mesurer. Pour les mesures effectuées par satellite, on parle de télédétection spatiale. Le rayonnement électromagnétique se propageant très bien dans le vide, c'est par l'intermédiaire des propriétés du rayonnement émis ou réfléchi par l'objet étudié qu'on en déduit ses propriétés (température, composition chimique, altitude…).

température de surface de la mer / SST (*Sea Surface Temperature*)

Température de l'eau de mer au voisinage immédiat de la surface.

Les premières mesures par bateau, au seau, donnaient la température vers 1 m de profondeur. Les mesures actuelles sur l'entrée des circuits de refroidissement prennent l'eau vers 5 m. Les mesures les plus précises se font par satellite : détection et analyse du rayonnement de corps noir émis par les premiers microns de l'eau, mais ceci n'est possible que là où il n'y a pas de nuages. Il s'agit dans ce cas d'une température de peau.

Les échanges thermiques entre la surface de l'eau et la base de l'atmosphère font de la SST un paramètre fondamental de la météorologie et du climat.

température globale

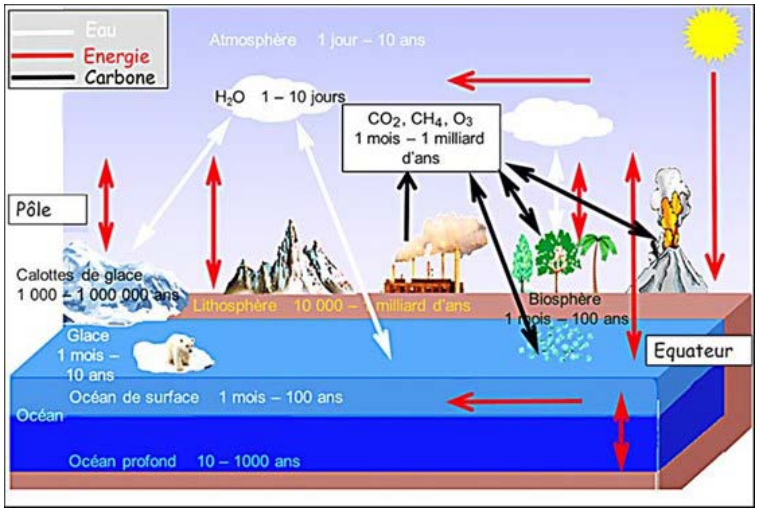
Température moyenne à la surface du globe référencée à 2 m. Elle est obtenue grâce aux mesures du réseau météorologique mondial. Les différentes stations de mesures sont complétées par les observations par satellites. La moyenne est obtenue après correction de biais tels que les îlots de chaleur urbains, et avec des interpolations variables selon les organismes les calculant, d'où des petits écarts entre les valeurs qu'ils fournissent.

tempête tropicale

Tempête, potentiellement précurseur de cyclone, dont la vitesse des vents est comprise entre 17,5 et 32,5 m/s (63 et 117 km/h).

temps caractéristique

Temps mis par une composante de l'environnement pour atteindre un nouvel équilibre après qu'elle ait subi une perturbation.



Les composantes de l'environnement échangent de la matière et de l'énergie, en interaction avec le climat. Les temps caractéristiques des divers processus climatiques liés vont de la journée au milliard d'années.

temps de résidence

Temps qui s'écoule entre le moment où un gaz a été ajouté dans l'atmosphère en excès par rapport aux puits naturels, et le moment où 50 % de cet excès ont disparu de l'atmosphère. La terminologie « durée de vie » est également utilisée pour les nuages. Les échanges de CO_2 entre l'atmosphère et l'océan ou la biosphère continentale sont considérables (voir cycle du carbone). Le facteur clef n'est donc pas directement les molécules émises par l'homme mais les quantités de gaz qui restent dans l'atmosphère après échanges entre les différents réservoirs.

théorie astronomique

Voir Milankovitch.

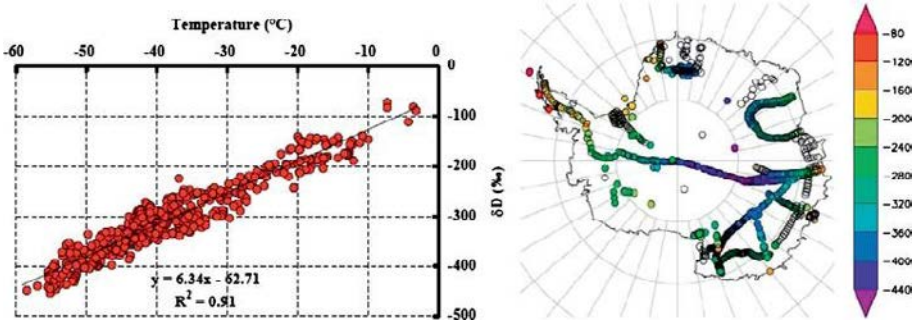
thermocline

Zone de fort gradient de température verticale se situant entre 50 et 300 m de profondeur selon la région océanique considérée. Elle sépare les eaux de surface brassées par le vent des eaux profondes plus isolées de l'atmosphère. Voir couche de mélange océanique.

thermomètre isotopique

Mesure des paléotempératures sur les calottes polaires à partir de la composition isotopique de la glace.

Du fait de la distillation atmosphérique, la vapeur d'eau qui atteint les régions polaires pour se transformer en neige et s'accumuler sur la calotte est d'autant plus appauvrie en isotopes lourds (deutérium, oxygène 18) que la température est plus basse.



L'analyse de la neige à la surface de l'Antarctique montre une relation linéaire entre température de surface et composition isotopique de la neige actuelle (en deutérium, sur la figure), conséquence des fractionnements isotopiques dans les processus de condensation et d'évaporation de l'eau dans l'atmosphère.

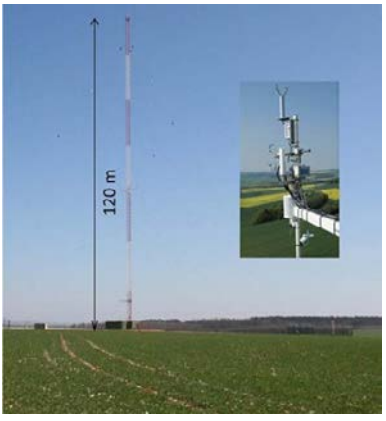
toundra et taïga (ou forêt boréale)

Deux types de végétation des régions froides (essentiellement polaires). La toundra est une végétation basse (plantes herbacées, lichens, mousses, petits arbrisseaux) avec une saison d'activité végétale très réduite. Quand les conditions

climatiques deviennent moins rudes, la toundra fait place à la taïga, végétation de type forestier (très majoritairement des conifères adaptés au froid) avec de grands réseaux lacustres.

tour à flux

Tour pour la mesure en continu des échanges de gaz à effet de serre ou de flux turbulents de chaleur et de quantité de mouvement entre le milieu environnant et l'atmosphère.



Tour de 120 m et son bras, instrumentés pour les mesures des flux de CO_2 (Observatoire pérenne de l'environnement de l'ANDRA à Houdelaincourt dans la Meuse).

tourbière

Milieu marécageux riche en matières végétales décomposées (la tourbe). En cas de sécheresse, les tourbières peuvent brûler en profondeur dégageant de grandes quantités de CO_2, un feu très difficile à éteindre.

traînée de condensation

Traînée blanche créée par la condensation de la vapeur d'eau émise par les moteurs d'avion à haute altitude quand la température est inférieure à –39 °C et le taux d'humidité dépasse 68 %. Ces traînées, analogues à des cirrus, apportent une faible contribution (2 %) à l'effet de serre d'origine anthropique.

transfert radiatif

Propagation du rayonnement électromagnétique à travers l'atmosphère.

Au sein de l'atmosphère, le rayonnement peut être absorbé, défléchi ou diffusé par les particules qui s'y trouvent : molécules, gouttes d'eau, cristaux de glace, poussières. L'ensemble des processus conduisant à ce qu'on ne trouve plus le photon dans sa direction initiale est regroupé sous le nom d'extinction.

transport de chaleur

Voir machine climatique.

tropopause

Haut de la troposphère. La tropopause sépare la troposphère de la stratosphère.

troposphère

Couche inférieure de l'atmosphère, entre la surface terrestre et 10 à 15 km selon les latitudes et la saison. La troposphère est chauffée par le bas. La chaleur y est transportée vers le haut par convection. C'est un milieu turbulent, et c'est là qu'ont lieu la plupart des phénomènes météorologiques.

Voir aussi atmosphère.

trou d'ozone

Concentration anormalement basse d'ozone dans la stratosphère autour d'un pôle, particulièrement au-dessus de l'Antarctique, au printemps.

Le chlore libéré par les chlorofluorocarbures (CFC) sous l'action du Soleil quand la température est très basse (tout début du printemps) détruit les molécules d'ozone.

Voir aussi protocole de Montréal.

turbulence

Présence, au sein d'un fluide de tourbillons dont les caractéristiques géométriques varient constamment donnant au fluide une apparence très désordonnée. La turbulence assure l'essentiel du mélange dans la basse atmosphère et dans la couche superficielle des océans et les échanges de chaleur et d'eau entre les milieux.

Fumée turbulente.

UNFCCC

United Nations Framework Convention on Climate Change = Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique, adoptée au sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992.

upwelling

Remontée d'eau froide du fond des océans.

L'eau qui remonte est riche en sels minéraux, ce qui favorise le développement du plancton à la base de toute la chaîne trophique créant donc des conditions

favorables pour le développement des poissons et la pêche. Ces remontées se produisent le long de côtes ou de l'équateur, où les vents forts en écartant les eaux de surface créent un appel d'eau profonde.

usage des sols

Pour satisfaire ses besoins, l'homme impose leur affectation aux sols.

Déforestation, modification de l'usage agricole ou pastoral, urbanisation… perturbent l'évapotranspiration, modifient l'albédo et la rugosité du sol, en altèrent le stock de carbone (parties aériennes de la végétation, litière, racines et micro-organismes du sol), toutes choses qui ont un impact sur le climat.

validation

Tests de la validité d'un modèle permettant de vérifier que le modèle reproduit les processus pour lesquels il a été conçu. On parle aussi d'évaluation du modèle.

Les paramètres des modèles de climat sont ajustés pour reproduire correctement l'équilibre énergétique. Pour valider un modèle et avoir confiance dans ses projections des climats du futur, on s'assure, sans toucher aux valeurs des paramètres, qu'il reproduit correctement divers climats et en particulier ceux du passé : dernier millénaire, et particulièrement périodes glaciaires, dont les climats étaient très différents de l'actuel.

vapeur d'eau

Le plus important des gaz de l'effet de serre naturel.

Contrairement au CO_2, la vapeur d'eau injectée dans l'atmosphère ne s'y accumule pas. Ce sont les conditions thermodynamiques (voir Clausius-Clapeyron) qui déterminent la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

vapeur saturante

Vapeur en équilibre thermodynamique avec l'eau (voir Clausius-Clapeyron).

variabilité du climat

Le fait que les caractéristiques du climat varient de façon statistiquement plus durable que des événements météorologiques. La variabilité peut être due à des processus propres au système climatique (variabilité interne), ou à des modifications de forçages externes (volcanisme, ensoleillement, action de l'homme…).

variabilité interne

Voir variabilité du climat.

vent

Déplacement d'air provoqué par des différences locales de pression ou de température. La vitesse et l'ampleur géographique des vents sont très diverses. Le vent agit sur l'environnement et par là sur le climat : oxygénation des eaux, érosion des sols avec soulèvement de poussières et transport de minéraux.

vent catabatique

Vent descendant dû au poids d'une masse d'air froid qui dévale une pente, parfois à des vitesses très élevées.

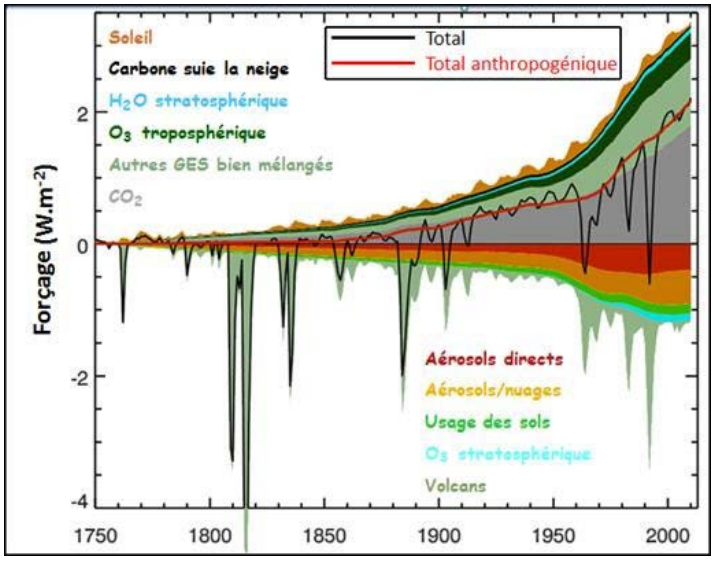
Les vents catabatiques se rencontrent en montagne, et en Antarctique où leur vitesse peut atteindre 250 km/h.

ventilation des océans

Processus qui transporte de l'eau chargée en oxygène vers l'océan profond. La circulation thermohaline et les formations d'eau intermédiaire dans les moyennes latitudes jouent un rôle important dans la ventilation de l'océan mondial.

volcanisme (action sur le climat)

Les poussières émises par les volcans font écran au rayonnement solaire. Après une éruption volcanique majeure (par exemple, Pinatubo), la température globale moyenne chute de ½ degré pendant environ 2 ans. Les éruptions moins importantes peuvent aussi avoir une influence sur la température globale si elles sont suffisamment fréquentes. Perturbant le transport de chaleur océanique, leur action peut s'étendre sur plusieurs années après l'éruption. Le Petit Âge glaciaire a vraisemblablement été initié par une série d'éruptions volcaniques.



Forçages du climat depuis 1750 ($W \cdot m^{-2}$). Les grandes éruptions volcaniques ont apporté un forçage négatif majeur mais de durée limitée.

vortex polaire

Vaste cyclone stable localisé surtout pendant l'hiver dans la haute et moyenne troposphère et dans la stratosphère près d'un pôle géographique de la Terre.

Le vortex polaire antarctique isole le continent du reste de la Terre et favorise la formation du trou d'ozone.

vulnérabilité climatique

Caractérise l'ampleur de l'impact négatif qu'un phénomène climatique d'origine naturelle ou anthropique (réchauffement, variabilité, extrêmes) peut avoir sur une région ou une population. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'importance et du rythme des changements auxquels le système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation.

Walker

Gilbert Thomas Walker (1868-1958) : physicien et statisticien britannique, particulièrement connu pour sa description de l'oscillation australe ENSO. Son nom a été donné à la circulation de Walker.

WCRP

World Climate Research Programme : Programme de recherche sur le climat mondial. Il a été créé en 1980 par le Conseil international de la science (ISC) et l'Organisation météorologique mondiale (WMO), rejoints en 1993 par la Commission océanographique internationale (IOC). Il a pour objectifs de faciliter l'analyse et la prédiction des changements du système climatique pour nombre d'applications pratiques utiles à la société.

Ses quatre projets de base concernent le climat et la cryosphère, le climat et la variabilité océanique, les échanges globaux d'énergie et d'eau, le rôle climatique des processus d'interaction stratosphère-troposphère.

WMO

World Meteorological Organization = Organisation météorologique mondiale. Agence des Nations unies fondée en 1950 pour remplacer l'Organisation météorologique internationale (IMO) qui datait de 1873. La WMO est un organisme intergouvernemental regroupant 191 pays et territoires.

Zone de convergence intertropicale / ZCIT (en anglais ITCZ)

C'est la zone proche de l'équateur où convergent les alizés venant de l'hémisphère nord et ceux venant de l'hémisphère sud. Cette zone centrée sur l'équateur saisonnier (l'équateur géographique aux équinoxes) se déplace avec les saisons vers l'hémisphère le plus chaud et contribue ainsi à la redistribution de chaleur entre les hémisphères.

zone tempérée

Zone dans un système de circulation atmosphérique de Ferrel, comprise approximativement entre le 40e et le 60e parallèle, où le climat ne présente que des contrastes et des extrêmes limités (ni chaleurs torrides ni froids polaires).