Climat

RÉUSSIR LE CHANGEMENT

Comprendre la complexité du changement climatique

VOLUME 3 - ÉLÉMENTS SCIENTIFIQUES

raee RhônAlpEnergie Environnement

Région RhôneAlpes

Introduction

La communauté scientifique est unanime sur l'engagement du changement climatique.

L'incertitude porte désormais sur l'ampleur du phénomène et sur ses effets locaux. Il s'agit donc à la fois :

- d'agir sur les émission de gaz à effet de serre (GES) pour limiter ce changement (politiques d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre),
- d'anticiper les évolutions pour être en capacité de s'adapter à un environnement modifié (stratégies d'adaptation aux effets du changement climatique).

Face à la complexité des phénomènes climatiques et l'urgence d'agir, il est impératif de ne pas laisser se diffuser des ambiguïtés liées à des idées reçues, des partis pris, des vulgarisations incomplètes… Il ne s'agit pas de simplifier pour fournir une réponse unique, mais de rendre accessible la compréhension des évolutions du climat et de l'action de l'Homme dans le changement global en cours. C'est en connaissance de cette complexité que chacun prendra conscience de l'importance du sujet et contribuera à l'élaboration d'une réponse possible à son échelle.

Ces fiches viennent compléter les guides 1 et 2 « Climat : réussir le changement » qui s'attachent à fournir des pistes aux personnes en charge de mettre en place des plans d'adaptation aux effets du changement climatique. Elles permettent d'aller plus loin dans la connaissance du changement climatique, de certains de ses effets et des mécanismes naturels d'adaptation à l'échelle planétaire. Les animateurs de démarches d'adaptation pourront ainsi mieux construire leurs exposés et vulgariser la connaissance scientifique lors de réunions de travail sur ce sujet avec les acteurs du territoire.

Au total, onze fiches forment la synthèse d'un travail de bibliographie d'ouvrages et d'articles scientifiques. Lisibles indépendamment les unes des autres, leur ordonnancement privilégie la lecture d'abord des fiches sur le fonctionnement général du climat et le phénomène de changement climatique, puis celles présentant les impacts du changement climatique.

Guidé par l'intention de donner accès à la complexité scientifique, le comité de lecture issu du Groupe de réflexion et d'action sur le changement climatique (GRAACC) animé par Rhônalpénergie-Environnement en Rhône-Alpes a choisi de structurer le travail autour d'objectifs pédagogiques. Ces objectifs propres à chaque fiche permettent de faire le lien entre l'apport scientifique et les préoccupations des chargés de mission. Des encarts conclusifs synthétisent en fin de fiche les principaux enseignements à retenir.

A l'issue de cette lecture attentive, le lecteur comprendra pourquoi les temps de réponse des écosystèmes, et l'ampleur planétaire des phénomènes, viennent troubler la prise de conscience des changements climatiques en cours. Il aura aussi compris que les sujets d'écologie tels que les émissions de gaz à effet de serre, pollutions à l'ozone, pluies acides, … peuvent se rejoindre, se conjuguer ou se contrarier au cœur de la question climatique.

L'évidence de prendre en compte très en amont les effets sur les écosystèmes des choix de société vient s'imposer au lecteur en fin d'ouvrage. Respect des équilibres

et réduction de son empreinte écologique sont sans doute les meilleures mesures de prévention ou de réparation de dommages écologiques, mais aussi d'adaptation aux effets du changement climatique.

VALIDATION SCIENTIFIQUE :
ROLAND SOUCHEZ, GLACIOLOGUE DES RÉGIONS POLAIRES, PROFESSEUR ÉMÉRITE DE L'UNIVERSITÉ DE BRUXELLES, MEMBRE DE L'ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE.

QUELQUES REPÈRES SUR L'ATMOSPHÈRE

L'atmosphère est divisée en plusieurs couches d'importance variable : leurs limites ont été fixées selon les discontinuités dans les variations de la température, en fonction de l'altitude.

LIMITES SUPÉRIEURES DE COUCHES	
Exosphère	10 000 km
Thermosphère	690 km
Mésosphère	85 km
Stratosphère	50 km
Troposphère	2 km

Voir aussi

Une vulgarisation des phénomènes physico-chimiques entrant dans la composition de l'atmosphère et des problèmes de pollution sur le site pédagogique OMER7-A pour l'étude de la pollution atmosphérique, de ses causes et de ses conséquences : http://omer7.sedoo.fr/index.html#

POUR ALLER À L'ESSENTIEL

Voir aussi

Une vulgarisation de la question climatique sur le site du CNRS : www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/

Repères, Chiffres clés du climat - France et Monde, Édition 2013, Service de l'observation et des statistiques, Commissariat général au développement durable : www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2012/Climat-ed-2013/reperes-fr-ed2013.pdf

5ème rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures, site Internet de vulgarisation, Réseau Action Climat France : http://leclimatchange.fr

Climat en péril, Guide grand public des derniers rapports du GIEC, PNUE, 2009 : www.unep.org/pdf/0903ClimateInPerilfinaldraft.pdf

Sommaire

Introduction p.02

› Quelques repères sur l'atmosphère p.03
› Pour aller à l'essentiel p.03

Fiches explicatives

FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique p.05
› Faire la différence entre la variabilité du climat et le changement climatique

FICHE 2 › Le réchauffement global actuel p.11
› Comprendre le changement climatique, son origine et la diversité des situations locales

FICHE 3 › Gaz à effet de serre et aérosols p.18
› Comprendre l'importance relative des gaz et aérosols mis en cause dans l'effet de serre additionnel

FICHE 4 › Principes physico-chimiques impliqués dans l'effet de serre p.24
› Comprendre l'effet de serre et les déséquilibres introduits par l'Homme

FICHE 5 › Puits de carbone versus sources de carbone p.29
› Comprendre le cycle du carbone et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre

FICHE 6 › Effets du changement d'affectation des terres et de l'agriculture p.36
› Comprendre l'importance du changement d'affectation des terres sur le climat

FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère p.39
› Savoir considérer les interactions entre problématiques environnementales

FICHE 8 › Changement climatique et océans p.43
› Apprécier le rôle fondamental des océans dans la régulation du climat

FICHE 9 › Changement climatique et cryosphère p.47
› Clarifier le rôle et l'importance relative des composantes de la cryosphère

FICHE 10 › Changement climatique et biodiversité p.52
› Savoir aborder la question de l'adaptation des milieux naturels aux effets du changement climatique

FICHE 11 › Evénements météorologiques et climatiques extrêmes et leurs conséquences p.59
› Comprendre les difficultés d'appréciation de l'influence du changement climatique sur l'évolution des événements météorologiques et climatiques extrêmes

Bibliographie p.65

Figures et tableaux p.68

Remerciements p.70

LES FACTEURS DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE

Faire la différence entre la variabilité du climat et le changement climatique

Il est régulier de nier l'importance du changement climatique sous prétexte que le climat terrestre varie depuis des millions d'années. En effet, de grands cycles climatiques ont lieu sur des périodes de 100 000 ans depuis des millions d'années. Ces variations qualifiées de "naturelles", sont principalement liées à l'activité du soleil et aux variations orbitales de la Terre. Elles ne sont perceptibles qu'à l'échelle géologique.

C'est la combinaison des influences naturelles qui provoque l'alternance de longues périodes glaciaires (environ 50 000 ans), suivies par des périodes interglaciaires plus courtes (de 10 000 à 20 000 ans) et plus chaudes.

D'autres facteurs provoquent des variations visibles au cours d'une vie humaine : l'activité volcanique et les interactions océans-atmosphère qui sont des facteurs naturels, l'activité humaine qualifiée de facteur anthropique.

Le facteur anthropique, quant à lui, en introduisant un déséquilibre dans la composition de l'atmosphère aura pris 100 ans pour faire sentir ses effets sur la température globale. L'augmentation moyenne observée des températures (+0,8°C) est liée à cette action anthropique et à ses émissions de gaz à effet de serre. Les scientifiques prévoient qu'elle s'accroisse d'ici 2100 et passe de +0,8 à une fourchette de +1,4 à +5,8°C. Cette augmentation peut alors être comparée aux 5°C nécessaires pour passer d'une période glaciaire à interglaciaire.

On notera que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), fait la distinction entre les "changements climatiques" qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la "variabilité climatique" due à des causes naturelles. Ainsi, dans son Article 1, les "changements climatiques" sont définis comme étant des "changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables."

Cette fiche explique comment chaque facteur naturel influence la variabilité du climat.

QU'EST-CE QU'UNE TÂCHE SOLAIRE ?

C'est une région sur la surface du soleil qui est marquée par une température inférieure à son environnement et par une intense activité magnétique.

QU'EST-CE QUE LE FORÇAGE ?

Le terme de forçage s'emploie en climatologie pour désigner les perturbations (expliquées ci-après) dans l'équilibre énergétique de la Terre, perturbations qui engendrent des changements de températures.

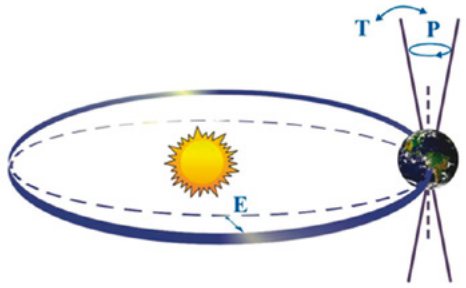
LES CYCLES DES TÂCHES SOLAIRES

Le Soleil est la première source de forçage naturel externe, c'est-à-dire que ce facteur d'influence ne prend pas sa source à la surface de la planète.
Il fournit 99.7% de toute l'énergie disponible sur Terre. Si les variations de son activité peuvent influencer le climat à l'échelle géologique, les variations de flux énergétiques liées aux cycles des tâches solaires connus sur les 200 dernières années environ sont insuffisantes pour expliquer directement les variations complexes du climat sur cette période *(Beniston, 2009)*.

LES PARAMÈTRES ORBITAUX DE LA TERRE

Les paramètres orbitaux, *cf. Figure 1*, de la Terre sont le second type de forçage naturel. L'excentricité de l'orbite de la Terre, l'obliquité de l'axe de rotation et la précession des équinoxes induisent des variations d'énergie solaire reçue par la Terre. La variation de ces paramètres orbitaux modifie sans cesse la position et l'exposition de la Terre par rapport au Soleil. Ces variations sont faibles, mais suffisantes pour modifier la part de l'énergie solaire qui arrive en chaque point de la surface de la Terre.

FIGURE 1 - Cycles de Milankovicth



P est la précession des équinoxes, E l'excentricité de l'orbite de la Terre et T est l'obliquité de l'axe de rotation.

D'après http://ossfoundation.us

QU'EST-CE QUE L'ORBITE DE LA TERRE ?

L'orbite de la Terre est la trajectoire qu'elle décrit lorsqu'elle tourne autour du soleil en une année.

QU'EST-CE QUE L'EXCENTRICITÉ ?

Le mouvement de révolution étant perturbé par l'attraction des autres planètes qui gravitent autour du Soleil, cette trajectoire n'est pas un cercle mais une ellipse dont la courbure est définie par une variable appelée excentricité.

→ L'EXCENTRICITÉ DE L'ORBITE DE LA TERRE

L'excentricité de l'orbite terrestre varie entre 0,005 et 0,05 sur une période de 100 000 ans. Actuellement elle est d'environ 0,016. La variation de l'excentricité est "relativement faible puisqu'elle n'a jamais dépassé 7%" *(Berger, 1992)*, et elle montre une quasi-périodicité d'une durée moyenne de 100 000 ans. De plus, la quantité d'énergie solaire reçue est peu touchée par la variation de l'excentricité. Sur l'ensemble de l'année, "l'écart n'atteint que 0,2%" *(Leroux, 2004)*. Les fluctuations naturelles du climat liées uniquement à ce paramètre sont donc faibles.
En revanche, la forme de l'orbite terrestre, fixée par l'excentricité, module fortement l'insolation aux différentes latitudes au cours des différentes saisons *(Maréchal et Mélières, 2010)*. De même, la rotondité de la Terre influence la quantité d'énergie reçue aux différents points du globe. L'énergie reçue par unité de surface est supérieure à l'équateur qu'aux pôles. A l'équateur, le rayonnement solaire arrive plus perpendiculairement au sol. Les rayons sont plus obliques aux pôles.

→ L'OBLIQUITÉ DE L'AXE DE ROTATION DE LA TERRE

La périodicité de la variation de l'obliquité est d'environ 40 000 ans. La latitude des tropiques (Cancer et Capricorne) est définie par cette obliquité. Actuellement, elle est de 23°27' et elle varie entre 22,1 et 24,5°.
La diminution de l'angle (axe redressé, valeur plus proche de 22°) diminue les contrastes saisonniers, quand l'angle augmente (axe plus incliné, valeur plus proche de 25°) les contrastes sont accentués (Leroux, 2004). Dans le premier cas (axe redressé), les hivers sont doux et les étés sont frais. Dans le second cas, les hivers sont plus rudes et les étés plus chauds, la Terre étant plus proche du Soleil au solstice d'été. L'obliquité est le principal responsable des saisons sur Terre *(Bard, 2006).*

→ LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

La précession des équinoxes détermine la distance Terre-Soleil pour une saison donnée et varie entre des périodes de 23 000 et de 19 000 ans (Bard, 2006). "L'attraction gravitationnelle des autres planètes du système solaire provoque une lente giration de son axe de rotation et la [la Terre] fait osciller comme une toupie" (Leroux, 2004). Cette oscillation change le moment de l'année où la planète est le plus près ou le plus loin du Soleil. Ainsi, lors du solstice de juin, il y a 11 000 ans, la Terre était en position la plus proche du soleil alors qu'elle est en position la plus éloignée actuellement (en 2010). Inversement, le solstice de décembre correspondait à la position la plus éloignée *(Leroux, 2004).*

QU'EST-CE QUE L'OBLIQUITÉ OU L'INCLINAISON DE L'AXE DE ROTATION DE LA TERRE?

C'est l'angle formé entre l'axe des pôles et la perpendiculaire au plan orbital (ou plan de l'écliptique) ; cf. Figure 1. On peut aussi définir l'obliquité par l'angle formé entre l'équateur et le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil (plan orbital) lui-même.

QU'EST-CE QU'UN ÉQUINOXE ?

C'est un point de l'orbite terrestre qui est atteint lorsque le Soleil est exactement au zénith sur l'équateur terrestre. Il est alors à l'intersection du plan orbital et de l'équateur terrestre. Une année connaît deux équinoxes : le premier entre le 20 et le 22 mars (début du printemps), le deuxième entre le 20 et le 22 septembre (début de l'automne). Par extension, les équinoxes désignent les jours de l'année pendant lesquels se produisent ces passages du soleil au zénith.

QU'EST-CE QUE LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES ?

C'est le changement de direction de l'axe de rotation de la Terre. Ce changement lent entraîne un mouvement de l'axe sur un cône de révolution au cours d'une période d'environ 21 000 ans.

L'ACTIVITÉ VOLCANIQUE ET LES INTERACTIONS OCÉAN-ATMOSPHÈRE

L'activité volcanique est le forçage naturel interne le plus connu. Le second type de forçage naturel interne est dû à l'interaction entre l'atmosphère et l'océan. Deux anomalies climatiques en particulier traduisent l'extrême variabilité du couple océan atmosphère. Ce sont les phénomènes ENSO (El Niño-Southern Oscillation) et NAO (North Atlantic Oscillation) ou Oscillation Nord Atlantique. Ces fluctuations naturelles sont dites internes car elles sont provoquées par des phénomènes ayant lieu à la surface de la Terre.

QU'EST-CE QU'UN AÉROSOL ?

C'est un ensemble de particules, solides ou liquides, en suspension dans l'air. Dans le cas d'une éruption volcanique il s'agit de poussières, cendres volcaniques …

QU'EST-CE QUE LE BILAN RADIATIF DE LA TERRE ?

C'est la somme des quantités d'énergie reçues par le système climatique Terre-atmosphère et réémise vers l'espace. Lorsque le bilan est nul, la température moyenne de la planète est stable.

→ L'ACTIVITÉ VOLCANIQUE

Les éruptions volcaniques, entraînent un refroidissement général de la surface (Maréchal et Mélières, 2010) **et une faible émission de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone notamment)** (Beniston, 2009). La durée de l'influence sur le climat d'une éruption volcanique peut s'étendre de quelques semaines à deux voire trois ans (Beniston, 2009).

Lors d'une éruption volcanique, il y a des émissions d'aérosols et de gaz dans l'atmosphère.

Les aérosols d'origine volcanique contribuent habituellement à refroidir le climat en absorbant le rayonnement solaire et donc en diminuant la quantité d'énergie solaire arrivant à la surface de la Terre. **Cependant leur effet est limité** dans le temps puisque, à cause de leur masse, ils tendent à s'éliminer rapidement sous l'effet de la gravité ou sont lessivés par les précipitations. Leur présence est généralement de trop courte durée pour contribuer au refroidissement du climat sur une longue période (Beniston, 2009).

Le principal, en quantité et en importance, gaz émis lors d'une éruption volcanique est la vapeur d'eau ; le dioxyde de carbone et les produits soufrés dont le dioxyde de soufre (SO2) sont également émis en quantité importante. **Leur influence va dépendre de la hauteur d'émission.** Lorsque le dioxyde de soufre est émis dans la stratosphère (partie de l'atmosphère située entre 12 et 50 km d'altitude en moyenne), il se mélange généralement aux particules d'eau liquides, créant des gouttelettes d'acide sulfurique dilué (H2SO4) (Beniston, 2009). Avec la circulation stratosphérique, ces gouttelettes vont se répandre tout autour de la Terre et former un voile qui va sensiblement modifier le bilan radiatif de la planète. Ce voile a deux effets. Le premier est d'absorber une partie du rayonnement solaire, ce qui va provoquer le réchauffement de la stratosphère. Le second est de réfléchir une partie du rayonnement solaire. Le mécanisme de réflexion est prépondérant sur celui de l'absorption car il prive la surface de la Terre d'une partie de son rayonnement.

L'altitude d'émission est le principal facteur d'influence de l'impact d'une éruption volcanique sur le climat. Le volume de cendres et de gaz émis, ainsi que le contenu en soufre de l'éruption ont aussi une influence. En effet, plus le nuage et les aérosols sont élevés, plus le contenu en soufre est important, plus long sera l'effet de l'éruption volcanique sur le climat (Beniston, 2009).

Un dernier paramètre vient influencer l'impact d'une éruption sur le climat : la localisation du lieu d'émission. Effectivement, dans le cas d'une éruption située dans les régions tropicales, les aérosols et les gouttelettes vont se propager, dans un premier temps, autour de la zone d'émission (la zone équatoriale et tropicale), puis, dans un second temps, ils vont se répartir au nord et au sud des tropiques. Dans ce cas, la répartition peut se faire sur toute la planète. En revanche, si l'éruption a lieu aux moyennes ou hautes latitudes, le matériel volcanique demeure piégé dans les circulations d'ouest et ne va normalement pas affecter l'autre hémisphère (Be-

niston, 2009). C'est pourquoi finalement, l'activité volcanique a un impact très relatif sur le réchauffement climatique.

→ LE PHÉNOMÈNE ENSO (EL NIÑO-SOUTHERN OSCILLATION)

Le phénomène ENSO est dû à une anomalie de pression, entre Darwin et Tahiti, qui engendre différentes conséquences sur la circulation océanique et sur les conditions climatiques de cette région. C'est une **"fluctuation couplée de l'atmosphère et de l'océan Pacifique équatorial, avec des durées définies de deux à environ sept ans"** *(GIEC, 2007).*

L'ENSO est l'exemple majeur des interactions entre l'atmosphère et l'océan qui modifie le climat. La modification de la circulation océanique, dû à la variation d'intensité des alizés, entraîne un déplacement des zones de convection atmosphérique qui suivent les eaux chaudes. La modification de la circulation océanique à une telle échelle [bassin équatorial] implique des répercussions, plus ou moins fortes, et plus ou moins rapides, sur la circulation atmosphérique de la planète *(Fieux, 2010.)*

A = Tahiti
B = Darwin

→ L'OSCILLATION NORD ATLANTIQUE

L'Oscillation Nord Atlantique (indice NAO) influence le climat sur l'Europe et sur la région méditerranéenne.

Cette oscillation est due à une différence de pression entre les Açores et l'Islande. On utilise le terme oscillation parce qu'il y a un va-et-vient de l'air, dans la direction Nord-Sud, des régions arctiques et islandaises vers les Açores et la péninsule ibérique. Cette oscillation engendre des changements de la pression au sol […] de telle façon que quand la pression est plus élevée dans la ceinture subtropicale, elle est moins élevée au pôle, et réciproquement.

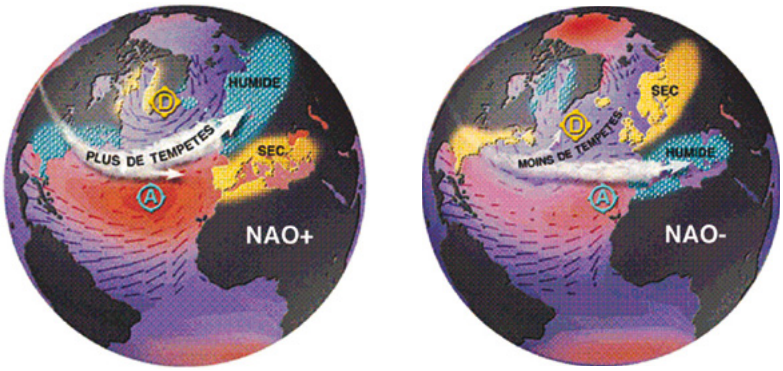
A = Islande
B = Açores

L'intensité relative de la différence de pression, indice NAO, est principalement défini sur l'hiver. Un fort anticyclone des Açores associé à une forte dépression d'Islande correspond à un indice NAO élevé (= NAO+), ce qui amène des pluies et des tempêtes en hiver plutôt sur la partie Nord de l'Europe *(Figure 2 à gauche)* et apporte une relative sécheresse sur l'Europe du sud et la région méditerranéenne. A l'inverse, un faible indice NAO (= NAO-) entraîne des précipitations plus importantes sur l'Europe du sud et des précipitations diminuées sur l'Europe du nord *(Figure 2 à droite)*. Les oscillations sont interannuelles et peuvent se renforcer sur plusieurs années voire décennies (Maréchal et Mélières, 2010).

QUE SONT LES ALIZÉS ?

Ce sont les vents dominants des régions intertropicales. Ces vents réguliers soufflent en moyenne du nord-est au sud-ouest dans l'hémisphère nord et du sud-est au nord-ouest dans l'hémisphère sud, c'est-à-dire des hautes pressions subtropicales vers les basses pressions équatoriales. Ils constituent ainsi deux ceintures symétriques dans les tropiques nord et sud.

FIGURE 2 - Influence de l'Oscillation Nord Atlantique sur la trajectoire des masses d'air



D'après M.Visbeck, Columbia University, USA

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le Soleil est la première source de forçage externe (c'est-à-dire qui ne prend pas sa source à la surface de la planète) de l'équilibre énergétique de la Terre et les paramètres orbitaux viennent moduler l'énergie solaire reçue.
- L'activité volcanique est une source de forçage interne qui a une influence de faible importance sur la température globale par rapport à celle de l'activité anthropique.
- Le second type de forçage naturel interne est dû à l'interaction entre l'atmosphère et l'océan. Les phénomènes qui en résultent sont extrêmement variables.

LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL ACTUEL

Comprendre le changement climatique, son origine et la diversité des situations locales

La communication sur le changement climatique favorise la confusion entre les évolutions météorologiques locales et le phénomène globale de réchauffement climatique.

Le climat planétaire est une notion apparue, lors de la décennie 1960-1970 avec l'apparition des ordinateurs qui ont permis d'agréger toutes les données enregistrées en de nombreux points de la Terre par les stations météorologiques et ainsi de faire une moyenne planétaire. C'est aussi grâce à ces ordinateurs qu'il a été possible de corréler les émissions de GES avec l'augmentation globale des températures. Le terme "climat planétaire" a rapidement été employé, même si la température était la seule variable utilisée. Il est en effet trop difficile d'obtenir une valeur moyenne planétaire pour les autres variables (vent, nébulosité, précipitation…) du fait d'une variabilité trop importante ou tout simplement d'une indisponibilité des données. D'où l'emploi du terme de réchauffement climatique pour exprimer la réalité physique de l'augmentation récente de la température moyenne au niveau du globe.

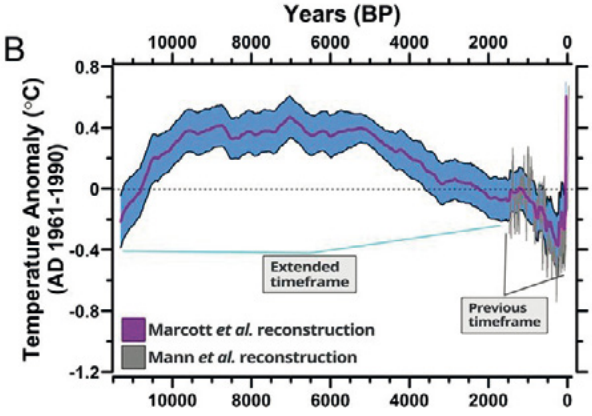
Pour autant, les paramètres météorologiques aux différents points du globe peuvent être très variables entre le jour et la nuit, entre l'été et l'hiver, et également d'une année sur l'autre. C'est pour ces raisons que d'éventuelles tendances climatiques locales ne peuvent être décelées qu'en analysant des paramètres caractéristiques sur une période suffisamment longue (généralement 30 ans est retenue comme un minimum) et que ces évolutions peuvent différer de l'évolution du climat planétaire.

L'Académie des Sciences, dans son rapport d'octobre 2010, affirme l'origine anthropique du changement climatique et décrit une augmentation de la température de surface sur la Terre de 0,8 ± 0,2 °C depuis 1870[1] . Ce réchauffement global calculé ne se traduit pas uniformément, ni également selon les saisons et les régions. Des variations temporelles et spatiales du climat sont à prendre en considération *(GIEC 2007)*.

Cette fiche présente les principes d'observation et de calcul de températures au niveau planétaire qui ont conduit à une meilleure connaissance du réchauffement climatique et de son origine anthropique.

[1] Augmentation, lissée dans le temps, de la température moyenne sur la surface de la Terre.

FIGURE 3 - Reconstructions des anomalies de température à l'échelle du globe et de chaque hémisphère par rapport à la moyenne 1961-1990



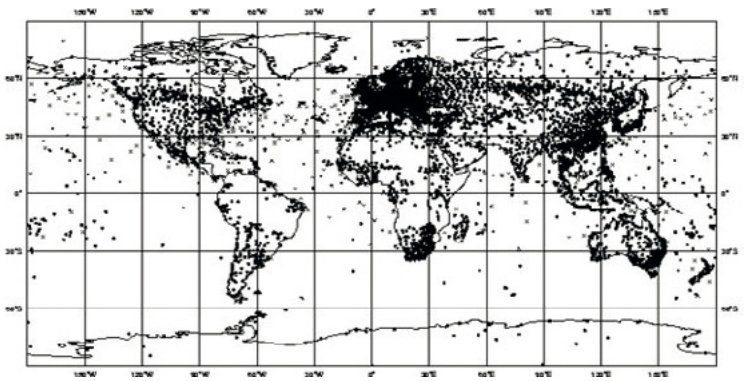
D'après Marcott et al, 2013 - www.gurumed.org/2013/03/09/les-tempratures-globales-sont-les-plus-chaudes-de-ces-4000-dernires-annes-et-bientt-des-11-000-prcdentes/

MESURE DU RÉCHAUFFEMENT

→ PRINCIPES

C'est à partir du réseau de stations, présenté dans la figure 4, que la moyenne planétaire des températures à la surface de la planète est réalisée. Des relevés isolés, enregistrés quotidiennement sur terre par quelques milliers de stations, sont combinés à des milliers d'autres relevés effectués à la surface de la mer par des navires sillonnant les océans, afin de produire une estimation mensuelle mondiale de la température moyenne. Pour obtenir des données cohérentes sur son évolution temporelle, les analyses portent plutôt sur les anomalies (écarts par rapport aux moyennes climatiques relevées sur chaque site), car celles-ci sont plus résistantes aux changements dans la disponibilité des données (GIEC 2007).

FIGURE 4 - Répartition à la surface de la Terre des 10 932 stations de mesure

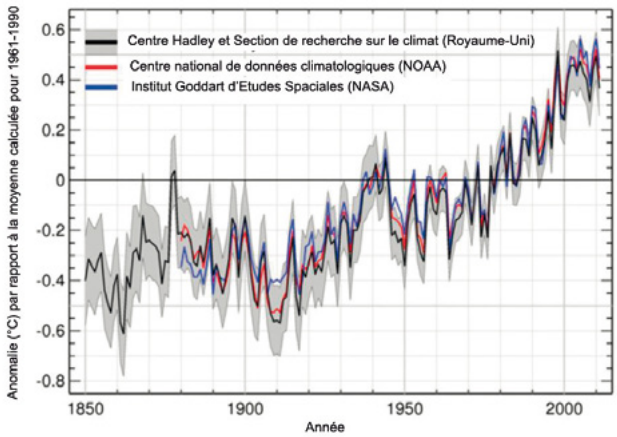


D'après Conférence Climat, Energie, Développement durable, donnée par Martine Tabeaud, le 27 mars 2010 à l'institut de Géographie, Paris lors du Forum : Enseigner le développement durable

→ RÉPARTITION TEMPORELLE DE L'AUGMENTATION DE TEMPÉRATURE

Bien que les mesures ne soient que partielles pendant la seconde moitié du XIXème siècle, le GIEC juge cependant qu'il est possible de les utiliser pour la période allant de 1850 à nos jours. L'étendue est bien meilleure après 1957, avec le début des relevés en Antarctique, et exhaustive depuis les années 1980, avec l'avènement des mesures par satellite.

FIGURE 5 - Anomalies de la température moyenne entre 1850 et 2010 pour l'ensemble du globe par rapport à la période de référence 1961-1990



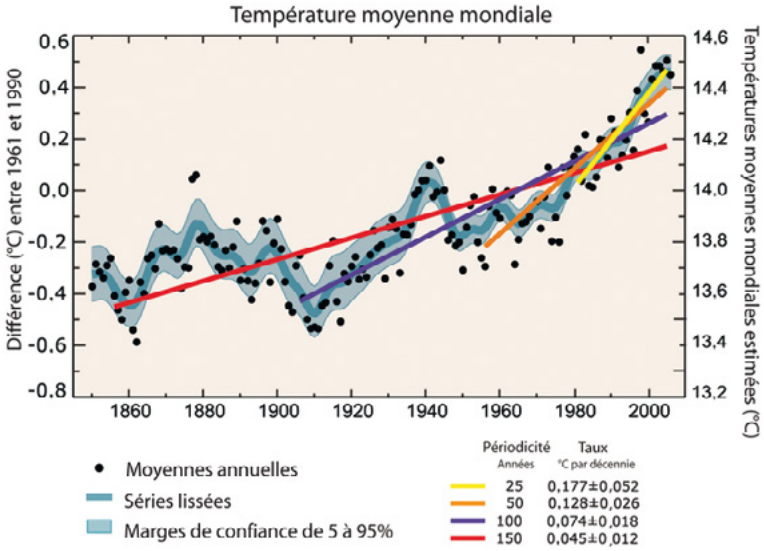
D'après le Centre Hadley du Service météorologique national et Section de recherche sur le climat de l'Université d'East Anglia, Royaume-Uni

Au cours de ce siècle, les évolutions de température n'ont pas été régulières. Deux périodes d'augmentation de la température sont visibles : l'une entre 1910 et 1940 et l'autre depuis 1970. En revanche, l'augmentation moyenne des températures a marqué un arrêt au cours des décennies 1950 à 1970. Cet arrêt peut s'expliquer, par deux raisons (Jean Jouzel, 2007) :

- la présence importante d'aérosols d'origine humaine (notamment les composés de soufre résultant de la combustion des fuels fossiles qui interceptent une partie du rayonnement solaire, qui provoquent des pluies acides et qui ont fait l'objet d'une lutte anti-pollution à partir des années 70), dont la conséquence principale est le refroidissement
- et la forte activité volcanique pendant cette période. En effet, plusieurs volcans, notamment le Mauna Loa (1950), l'Etna (1951), ou encore le Mont Agung en 1963 sont entrés en éruption durant cette période, favorisant un refroidissement. Voir aussi la FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique.

La *figure 6* montre également que **le réchauffement de ces dernières décennies (depuis 1970) est plus important que lors des décennies précédentes (notamment 1920-1940)**. Plus précisément, l'augmentation des températures sur la période 1980-2005 est de 0,177 ± 0,052 °C, alors qu'elle n'est que de 0,0074 à +0,018°C sur les 100 dernières années.

FIGURE 6 - Moyenne annuelle mondiale des températures relevées (points noirs) avec ajustement simples par rapport aux données



L'axe vertical de gauche montre les anomalies par rapport aux moyennes des années 1961-1990, celui de droite indique la température réelle.

D'après IPCC, 2007, WGI, FAQ 3.1

QU'EST CE QU'UNE RÉTROACTION POSITIVE ?

Souvent appelée "feedback", la rétroaction est une réaction d'un système à une entrée d'information. Elle est positive quand cette dernière en augmente l'effet. Quand la réaction se répète, la boucle de rétroaction peut entraîner son amplification continuelle.

→ RÉPARTITION SPATIALE DES ÉVOLUTIONS DE TEMPÉRATURE

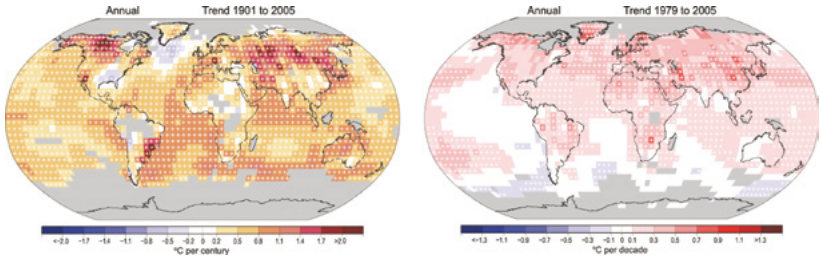
La répartition spatiale des évolutions de température à la surface de la Terre depuis 1901 permet de faire ressortir deux caractéristiques. *(Figure 7)*

D'une part, **le réchauffement est plus marqué sur les continents que les océans.** Cela s'explique par le fait que l'inertie thermique des océans est plus importante que celle des continents. Les océans étant plus étendus dans l'hémisphère sud, le réchauffement est plus limité. Il est observé notamment que l'Australie et l'Amérique du Sud ont subi un moindre réchauffement comparé à l'Europe, l'Amérique du Nord ou encore l'Asie.

D'autre part, le réchauffement est plus marqué **sur les hautes latitudes que sur les basses latitudes de l'hémisphère nord** *(Maréchal et Mélières, 2010)*.Cette amplification arctique est liée au fait que la neige et la glace, si elles fondent quelque peu, provoquent une diminution de la réflexion du rayonnement solaire, donc une absorption accrue de ce rayonnement, un réchauffement et ainsi une rétroaction positive sur le réchauffement planétaire.

En conclusion, **la moyenne planétaire du réchauffement** (0,74°C sur la période 1906-2005) **ne reflète pas la diversité des situations.** Certains territoires (les continents notamment) se sont réchauffés de manière plus importante que d'autres (les océans). **Le changement n'est pas uniforme en tout point de la planète.**

FIGURE 7 - Evolution de la température, avec à gauche, la tendance de 1901 à 2005 et, à droite, de 1979 à 2005



D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 3.9

RECHERCHE SUR L'ORIGINE DU RÉCHAUFFEMENT ACTUEL

Dans son quatrième rapport d'évaluation le GIEC affirme qu'il est "très improbable que le réchauffement du XXème siècle puisse s'expliquer par des causes naturelles" et que "l'influence humaine sur le climat est très probablement la cause dominante des changements survenus dans les températures moyennes à la surface du globe durant le demi-siècle passé". Parmi les travaux qui permettent de conclure à la mise en cause de l'activité humaine dans l'origine du réchauffement climatique, notons l'observation des températures dans les différentes couches de l'atmosphère, ou encore leur simulation par les modèles climatiques.

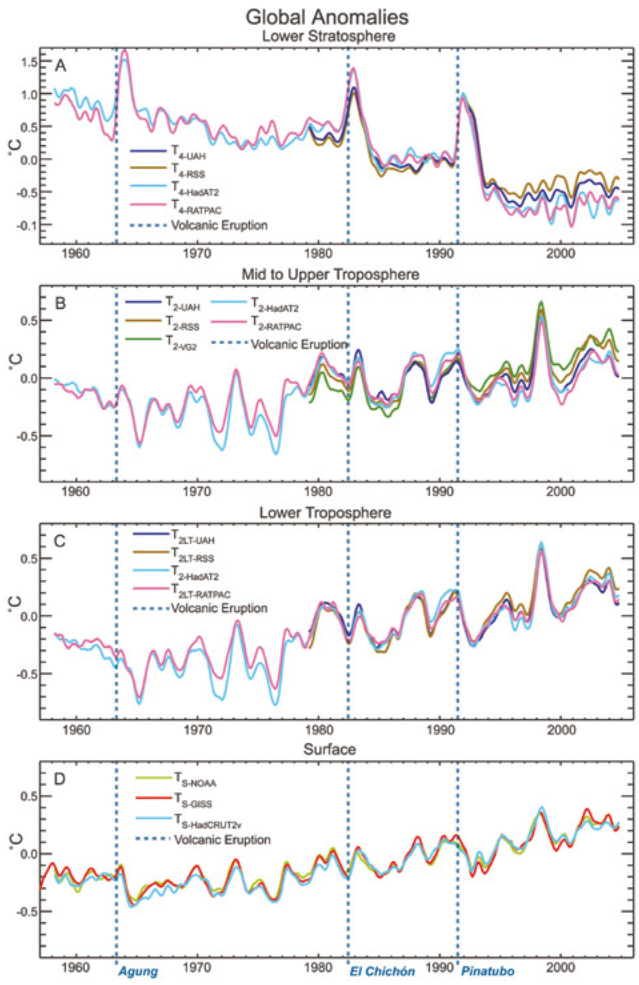
→ OBSERVATION DES TEMPÉRATURES DANS LES COUCHES DE L'ATMOSPHÈRE

Le premier élément, qui vient étayer la thèse que la variabilité naturelle ne peut expliquer le réchauffement du XXème siècle, est la mesure des températures dans les différentes couches de l'atmosphère. *(Figure 8)*

Si ce réchauffement provenait d'une augmentation de l'énergie solaire (augmentation de l'activité du soleil, ou modification de paramètres orbitaux) alors toutes les couches de l'atmosphère (stratosphère, troposphère et surface de la Terre) devraient se réchauffer. Or, alors que les observations à l'échelle de la planète, faites depuis la fin des années 1950, montrent que la troposphère (jusqu'à une altitude de 10 km environ) s'est réchauffée, et qu'elle s'est même réchauffée un peu plus vite que la surface de la Terre, des évaluations de température stratosphérique par radiosondages ajustées, par satellites et par réanalyses (méthode scientifique combinant observation et modélisation) convergent toutes qualitativement pour affirmer un refroidissement de l'ordre de 0,3°C et 0,6°C par décennie depuis 1979 *(GIEC, 2007)*.

En outre, certains travaux attribuent le refroidissement de la stratosphère soit à la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, d'autres à l'augmentation de l'effet de serre (car le rayonnement tellurique est davantage absorbé dans la troposphère et contribue donc moins au réchauffement de la stratosphère). Les évaluations actuelles attribuent ce refroidissement à ces deux facteurs (pour moitié à l'un et pour moitié à l'autre) *(Maréchal et Mélières, 2010)*.

FIGURE 8 - Températures de l'air observées pour les différentes parties de l'atmosphère



(de haut en bas : stratosphère inférieure (A), troposphère moyenne et supérieure (B), troposphère inférieure (C) et surface de la Terre (D).

D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 3.17

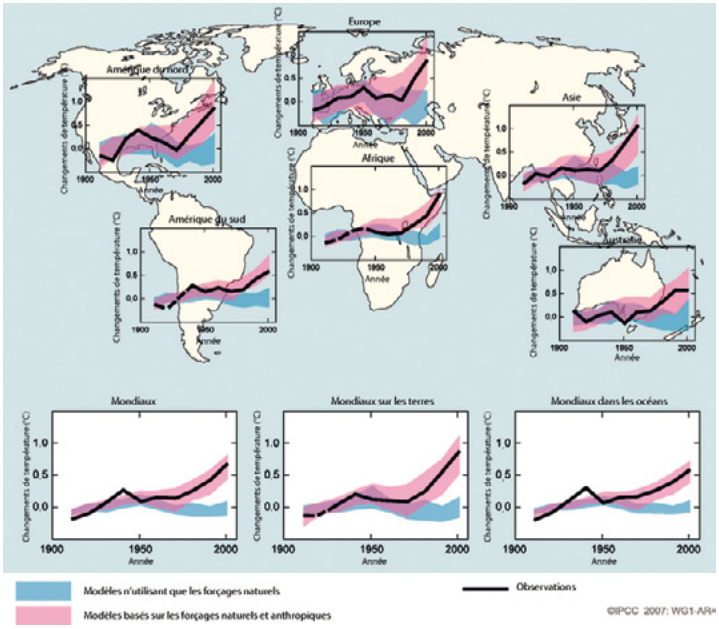
→ MODÉLISATION DES TEMPÉRATURES AVEC OU SANS INFLUENCE HUMAINE

Le second élément qui tend à démontrer que la variabilité du climat n'est pas à l'origine du réchauffement climatique, vient des simulations faites par un ensemble de modèles climatiques. *(Figure 9)*

Une quinzaine de modèles AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model) ont simulé l'évolution de la température au XXème siècle avec deux scénarios différents : l'un ne prenait en compte que l'évolution des conditions naturelles (activité volcanique et solaire), l'autre prenait en compte à la fois l'évolution des conditions naturelles et les perturbations liées aux activités humaines (les émissions de GES et d'aérosols, les changements d'occupation des sols, le changement de la couche d'ozone). C'est le second scénario qui correspond le mieux aux observations réelles.

Ces résultats rendent valable, sur les deux dernières décennies l'idée que le réchauffement ne peut pas être reproduit en ne tenant compte que des forçages naturels, et qu'il est principalement lié à l'émission des GES anthropiques *(Maréchal et Mélières, 2010).*

FIGURE 9 - Comparaison entre l'évolution des températures mesurées, dans différentes régions et à l'échelle mondiale (sur les terres émergées, dans les océans et les deux combinés), et l'évolution simulée par un ensemble de modèles climatiques.



La courbe bleue correspond à la simulation des forçages naturels, activité volcanique et activité solaire, alors que la courbe rose intègre les forçages naturels et anthropiques. La courbe noire est l'écart entre les moyennes décennales observées de 1906 à 2005 et celles observées de 1901 à 1950.

D'après IPCC, 2007, WGI, FAQ 9.2, Fig 1

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le changement climatique qui se caractérise à l'échelle de la planète par un réchauffement de la température globale est pour l'essentiel d'origine anthropique.
- Ce réchauffement global est calculé à partir de données locales réparties à la surface des continents et des océans.
- Il n'est pas uniforme en tout point du globe : il est plus marqué sur les continents que sur les océans et sur les hautes latitudes que sur les basses latitudes de l'hémisphère Nord.

GAZ À EFFET DE SERRE ET AÉROSOLS

Connaître l'importance relative des gaz et aérosols mis en cause dans l'effet de serre additionnel

Alors qu'il est maintenant acquis que l'émission anthropique de $C0_2$, référence pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre (GES), par un effet additionnel à l'effet de serre naturel est à l'origine du réchauffement climatique, d'autres gaz sont couramment oubliés. Il est aussi mal compris pourquoi les gaz ont des impacts différents.

Les GES constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, absorbent partiellement les rayonnements solaires et ceux émis par la surface de la Terre. Ils assurent ainsi le phénomène d'effet de serre, indispensable au maintien d'une température favorable à la vie sur Terre. Sans les principaux gaz à effet de serre (GES) naturels que sont la vapeur d'eau d'une part (elle contribue pour moitié à l'effet de serre naturel) et le gaz carbonique, d'autre part (il contribue au quart de l'effet de serre naturel), la température serait de l'ordre de -18°C au lieu de 15°C. L'émission de GES par les activités humaines accroit la concentration de GES dans l'atmosphère et renforce donc ce phénomène.

Le protocole de Kyoto identifie comme principaux GES sous influence de l'activité humaine : le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et les trois gaz halogénés : hydrofluorocarbure (HFC), perfluorocarbure (PFC) et hexafluorure de soufre (SF_6). Leur importance est fonction de leur concentration et de leur pouvoir de réchauffement global. Ainsi cet effet de serre additionnel est dû à 53% au dioxyde de carbone, à 17% au méthane, à 13% à l'ozone, à 12% aux halocarbures et à 5% au protoxyde d'azote (Le Treut, 2011).

Cette fiche décrit les caractéristiques de chaque gaz et leur influence sur l'effet de serre. *On parlera aussi ici des aérosols qui ont une influence sur le réchauffement global, soit directement, soit par combinaison avec d'autres processus intervenant sur la température de l'atmosphère.*

CARACTÉRISTIQUES ET ORIGINES

QU'EST-CE QUE LE TEMPS DE RÉSIDENCE D'UN GES ?
C'est le temps de présence d'un gaz dans l'atmosphère avant sa reprise dans les cycles biogéochimiques. La vapeur d'eau reste seulement quelques jours dans l'atmosphère. Mais la majorité des gaz à effet de serre reste bien plus longtemps : d'une décennie pour le méthane jusqu'à des milliers d'années pour certains gaz halogénés.

→ LA VAPEUR D'EAU (H_20)

La vapeur d'eau est "le plus grand contributeur à l'effet de serre naturel" *(Beniston, 2009)*, mais son temps de résidence dans l'atmosphère est de l'ordre d'une semaine seulement.

La majorité de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère n'est pas émise directement par l'homme. Cependant la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère dépend de la température, plus la température augmente, plus l'atmosphère peut contenir de vapeur d'eau. Par conséquent, **en influant sur la température, l'Homme peut modifier la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère et ainsi l'effet de serre.**

→ LE DIOXYDE DE CARBONE (CO_2)

C'est un gaz incolore, incombustible (à 2000° C, moins de 10% de molécules de CO_2 sont fractionnées), inodore et soluble dans l'eau.

Le CO_2 est le composé participant au cycle du carbone le plus stable énergétiquement et il est la matière première nécessaire à

l'élaboration des substances organiques par photosynthèse, donc il constitue le composé nutritif le plus important pour les plantes *(Bliefert et Perraud, 2004)*.

Le dioxyde de carbone est présent naturellement dans l'atmosphère et dans les océans, sous forme dissoute. Dans l'océan, les carbonates ($CaCO3^{2-}$) selon les conditions ambiantes peuvent produire du CO_2. Plus généralement il est produit naturellement par la respiration animale et végétale, les incendies, les éruptions volcaniques…

Les émissions anthropiques de dioxyde de carbone sont négligeables par rapport à la quantité de CO_2 déjà présente dans les différents réservoirs (océans, atmosphère, biosphère…). **Mais l'effet de ces émissions anthropiques est d'autant plus important que seulement 60% d'entre elles sont captées par les océans ou la biomasse des continents.** Cela signifie que les 40% restants résident dans l'atmosphère et sont la cause de l'augmentation de sa teneur en CO_2 *(Bliefert et Perraud, 2004)*.

Les émissions anthropiques mondiales de CO_2 proviennent pour plus de 75% de la combustion de combustibles fossiles, les changements d'affectation des sols (déforestation…) sont responsables du reste *(GIEC, 2007)*.

La teneur de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est passée de moins de 280 ppm vers 1850 à 400 ppm en 2013.

→ LE MÉTHANE (CH_4)

La source naturelle d'émission de méthane réside principalement dans les milieux humides (marais, marécage, étangs, toundra). Les océans, les lacs, la destruction des hydrates de méthane du pergélisol, l'activité des termites et autres insectes ou encore de la fermentation entérique (ruminants) représentent des sources additionnelles *(Bliefert et Perraud, 2004)*.

Les sources de méthane anthropique sont issues de la production d'énergie à partir de charbon (en combinaison avec le CO_2) et de gaz naturel, les décharges de déchets, l'élevage (de bovins et d'ovins, par exemple), la riziculture et la combustion de biomasse *(GIEC, 2007)*. A l'inverse du dioxyde de carbone, **les émissions de CH_4 d'origine humaine sont plus importantes que les sources naturelles** *(GIEC, 2007)*.

Le principal puits de méthane est la réaction chimique avec les radicaux hydroxyles (OH) dans la troposphère.

La quantité de méthane dans l'atmosphère était de 750 ppb vers 1750 et elle était en 2008 de 1797 ppb ; elle a donc plus que doublé sur cette période. *(Maréchal et Mélières, 2010)*.

→ LE PROTOXYDE D'AZOTE OU OXYDE NITREUX (N_2O)

Les principales sources naturelles d'émission de protoxyde d'azote sont les océans et les lacs, et, l'oxydation chimique de l'ammoniac dans l'atmosphère et les sols, notamment les sols tropicaux *(GIEC, 2007)*. Les sources naturelles et anthropiques sont aussi importantes l'une que l'autre.

Les sources anthropiques sont la combustion des fuels fossiles et de la biomasse ainsi que l'utilisation d'engrais synthétiques (sol et eaux souterraines) *(Bliefert et Perraud, 2004)*, mais également l'élevage ou des activités industrielles comme celle du nylon *(GIEC, 2007)*.

Le puits principal du N_20 se situe dans la stratosphère, où se produisent une photodissociation et une réaction avec l'ozone présent.

Entre 1750 et 2000, la concentration de N_2O est passée de 270 ppb en 1750 à 322 ppb en 2008.

QUE SONT PPM ET PPB ?

Ce sont des abréviations d'expressions utilisées comme unités de mesures de concentrations et de proportions. ppm pour "partie par million" soit 10^{-6} et ppb est l'abréviation de l'anglais "part per billion", c'est-à-dire "partie par milliard", soit 10^{-9}.

QU'EST-CE QU'UN PERGÉLISOL (OU PERMAFROST)?

C'est la partie du sol situé sous la surface (c'est un sous-sol) qui ne dégèle pas pendant au moins 2 années consécutives. L'accroissement de la température aux latitudes élevées entraine le dégel de ces sols et donc la libération du CH_4 qu'il contient.

QU'EST-CE QU'UN PUITS DE CARBONE, DE MÉTHANE, OU D'UN AUTRE GAZ ?

Au sens large et dans ce contexte, un puits est un réservoir, naturel ou artificiel, qui absorbe un gaz présent dans l'atmosphère et donc contribue à diminuer sa quantité. Cette absorption recourt à des processus biologiques ou chimiques : on parle alors de pompe biologique ou de pompe chimique. A l'inverse, un réservoir qui émet plus de gaz qu'il n'en stocke est considéré comme une source.

Pour l'exemple du gaz carbonique, les principaux « puits » sont aujourd'hui les océans, les sols (humus, tourbière) et les forêts en formation. La photosynthèse intervient alors comme une pompe biologique. Remarquons que ces mêmes réservoirs sont également « sources » de gaz carbonique. Le rôle de ces réservoirs peut cependant varier dans le temps. Un réservoir qui était une source peut devenir un puits et vice-versa.

→ LES GAZ HALOGÉNÉS (CFC, HFC, PFC, SF_6)

Les gaz halogénés sont persistants dans l'atmosphère et ne sont que très peu d'origine naturelle.
L'atmosphère, avant l'industrialisation, ne contenait que peu de gaz halogénés d'origine naturelle *(GIEC, 2007)*. Au cours de la deuxième moitié du XXème siècle, "le développement de nouvelles techniques de synthèse chimique a entraîné la prolifération de gaz halogènes d'origine industrielle chimique" *(GIEC, 2007)*.

Le principal gaz à effet de serre halogéné est le chlorofluorocarbone (CFC). Le CFC est un gaz entièrement artificiel que l'on retrouve dans les réfrigérants, les solvants et les bombes aérosols. Le protocole de Montréal et ses amendements successifs ont abouti à l'interdiction de la production de CFC et de halons, autre gaz halogéné, dès 1996 dans les pays développés, et leur remplacement par des produits de substitution. Les CFC ont été remplacés par les hydrofluorocarbures (HFC) qui sont bénins du point de vue de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique *(Beniston, 2009)* mais qui sont de puissants GES. C'est pour cela, qu'au même titre que l'Hexafluorure de Soufre (SF6) et les perfluorocarbures (PFC), ils sont concernés par le protocole de Kyoto.

→ L'OZONE (O_3)

L'ozone est un gaz qui se situe à deux niveaux de l'atmosphère :

- dans la troposphère (jusqu'à environ 12 km d'altitude), on parle alors d'ozone troposphérique. A ces altitudes, l'ozone est un polluant toxique pour la santé humaine et la végétation au-delà d'un certain seuil d'exposition. Sa formation se fait à partir de réactions chimiques avec des gaz précurseurs, issus de combustions, tel que les oxydes d'azote, le méthane ou le monoxyde de carbone sous l'effet de la lumière (photo-oxydation) *(Beaux, 2004)*.
- dans la stratosphère, on parle alors d'ozone stratosphérique qui forme la couche d'ozone. A ces altitudes, l'ozone permet de protéger les plantes, les animaux et les hommes des rayons UV du soleil. Il est formé à partir de la recombinaison d'un atome d'oxygène produit par photolyse (décomposition chimique sous l'action de la lumière), d'une molécule d'oxygène (O_2) et d'une autre molécule d'oxygène.

C'est dans la stratosphère que ce gaz secondaire, c'est-à-dire qui n'est pas émis directement dans l'atmosphère mais qui y est formé, **intervient naturellement dans le phénomène d'effet de serre.**

Comme il y est fait allusion au paragraphe précédent, il peut aussi être détruit suite à des réactions chimiques. Le gaz halogéné CFC, émis par l'homme et maintenant interdit par le protocole de Montréal, a cette particularité de réagir avec l'ozone et de le détruire. De même, le **N_2O, dont la concentration dans l'atmosphère ne fait que croître actuellement, est un gaz destructeur de la couche d'ozone** dans la stratosphère *(Souchez, 2010)*. Toute modification de sa concentration aura un impact sur l'équilibre radiatif de le Terre. Voir aussi la FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère.

→ LES AÉROSOLS

Les aérosols ne sont pas des gaz, mais des particules solides ou liquides présentes dans l'atmosphère.
Les particules ont des sources diverses et variées. Elles peuvent être naturelles : l'érosion provoquée par le vent, les émissions par les volcans (avec l'exemple en avril 2010 de l'éruption du volcan Eyjafjöll, en Islande), les feux de forêt, les océans (les sels marins), mais également anthropiques, les activités industrielles (cimenterie, fonderie, métallurgie, secteur minier…), les trafics routiers et aériens, l'utilisation de combustibles domestiques solides (charbon, bois, …), l'érosion des chaussées dues à la forte circulation routière et l'abrasion des pneus et des freins. Elles peuvent véhiculer d'autres polluants comme les métaux lourds, les hydrocarbures…

La taille de ces aérosols revêt une importance particulière puisque c'est elle qui détermine leur durée de vie et leur impact dans l'atmosphère. Les particules supérieures à 10 µm, voire celles comprises entre 3 et 10 µm ne sont plus forcément considérées comme des particules en suspension car elles ont une faible durée de vie dans l'atmosphère et peuvent sédimenter sous l'effet de l'attraction de la Terre. En dessous de 0,25 µm, on parle de particules fines et d'enjeux de santé publique.

Leur rôle sur le climat est complexe et pas encore totalement bien estimé quantitativement. On distingue des effets directs intervenant sur l'absorption des rayonnements solaires et indirects favorisant la formation des nuages et la fusion des neiges et glaces.

En suspension, les aérosols, selon leur type (sulfates, suies, autres…) :

- limitent plus ou moins l'arrivée du rayonnement solaire vers le sol et tendent ainsi à générer un forçage négatif,
- absorbent le rayonnement solaire dans les basses couches de l'atmosphère et favorise un forçage positif,
- agissent comme des noyaux de condensation pour la fabrication des nuages qui en réfléchissant le rayonnement solaire favorisent un forçage négatif.

L'exemple des suies :
Les suies se présentent sous la forme de fines particules de diamètres compris entre quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres : elles pénètrent donc facilement dans le système respiratoire et même, pour les plus fines, dans le système sanguin *(Maugendre, 2009)*. S'agissant du changement climatique, les suies, une fois déposées sur les neiges et les glaces, en diminuent l'albédo et favorisent leur fusion ; d'où un impact important dans les régions enneigées et englacées. Cet impact est très marqué en Arctique et contribue de manière substantielle (pour moitié environ), indépendamment du $C0_2$, à l'amplification du réchauffement dans ces régions.

Les suies peuvent avoir des conséquences sur de nombreux paramètres (forçage radiatif, fonte des glaces, élévation du niveau de la mer). Or selon des études scientifiques récentes, l'impact des suies aurait été sous-estimé par le GIEC dans le quatrième rapport d'évaluation. D'après Souchez *(2010)*, on estime le forçage radiatif dans l'atmosphère des suies à 0,9 W/m². (*Figure 10* de la FICHE 4 › Principes physico-chimiques impliqués dans l'effet de serre)

La réduction des émissions de suies pourrait donc être bénéfique à la fois à l'environnement et à la santé publique.

QU'EST-CE QUE LE FORÇAGE ?

Le terme de forçage s'emploie en climatologie pour désigner les perturbations (expliquées ci-après) dans l'équilibre énergétique de la Terre, perturbations qui engendrent des changements de températures.

QUE SONT LES SUIES ?

Ce sont des aérosols solides de couleur foncée (noire) qui sont issues de la combustion incomplète des combustibles fossiles ou de la biomasse. La suie est générée par les incendies, le trafic routier, la pollution industrielle ou encore la pollution domestique par l'intermédiaire des fourneaux de cuisine et des chauffages.

QU'EST-CE QUE L'ALBÉDO ?

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. "Les surfaces enneigées ont un albédo élevé […] et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible" (*GIEC, 2007)*.

POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Le potentiel de réchauffement global (PRG, ou en anglais Global Warning Potential, GWP) est **un indice relatif qui a été créé afin de pouvoir comparer l'effet des différents GES anthropiques à celui du CO_2**. Cet indice n'est pas utilisé pour les aérosols.

Le PRG du CO_2 est donc par convention toujours de 1.
Le PRG peut être calculé sur différentes périodes (20 ans, 100 ans, 500 ans).

"Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de carbone." *(GIEC, 2007)*. Autrement dit, il représente "l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le rayonnement infrarouge sortant" *(GIEC, 2007)*.

"L'influence des facteurs susceptibles de changer le climat, tels que les gaz à effet de serre, est souvent évaluée par rapport à son forçage radiatif." *(GIEC, 2007)*.

Voir aussi la FICHE 4 › Principes physico-chimiques impliqués dans l'effet de serre.

Ainsi, le **PRG d'un gaz se définit aussi comme le forçage radiatif cumulé sur une période déterminée d'une quantité de gaz donnée.**

Le tableau 1 extrait des chiffres clés du climat, 2011, du SOeS, indique, pour les six GES du protocole de Kyoto, la durée de vie dans l'atmosphère et le Potentiel de Réchauffement Global à 20 et à 100 ans.

TABLEAU 1 - PRG des six gaz à effet de serre du protocole de Kyoto

	CO_2	CH_4	N_20	HFC	PFC	SF_6
Concentration atmosphérique 2005	379 ppm	1 774 ppb	319 ppb	60,6 ppt	76,9 ppt	5,6 ppt
Durée de séjour dans l'atmosphère	entre 2 ans et des milliers d'années	12 ans	114 ans	entre 1 et 260 ans	environ 10 000 ans	3 200 ans
Pouvoir de réchauffement global (cumulé sur 100 ans)	1	25	298	[124 ; 14 800]	[7 300 ; 12 200]	22 800
Origine des émissions anthropiques	combustion d'énergie fossile et déforestation tropicale	décharges, agriculture, élevage et procédés industriels	agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais	sprays, réfrigération, fonte d'aluminium		
Modification du forçage radiatif depuis 1750 par les émissions anthropiques (W/m^2)	+ 1,66	+ 0,48	+ 0,16	+ 0,337		

Notes : ozone et vapeur d'eau non inclus du fait de leurs cycles complexes.
ppm : partie par million - ppb : partie par milliard - ppt : partie par trillion
Source : GIEC, 1er groupe de travail, 2007

D'après IPCC, 2007

On lit par exemple, que le PRG à 100 ans du protoxyde d'azote est de 298. Cela signifie que l'impact d'1 kg de protoxyde d'azote équivaut à celui de 298 kg de dioxyde de carbone sur une période de 100 ans. Il est également possible de dire que le protoxyde d'azote a un pouvoir de réchauffement 298 fois supérieur au dioxyde de carbone. Autre exemple, le PRG à 100 ans du méthane étant de 25, l'impact d'1 kg de méthane est équivalent à celui de 25 kg de dioxyde de carbone.

Ainsi, on peut noter que la plupart des GES ont un potentiel de réchauffement global plus fort que le CO_2 lui-même. Il est donc nécessaire de porter attention à ces émissions et de ne pas se restreindre à réduire uniquement les émissions de CO_2. D'autant que certains de ces GES anthropiques ont d'autres conséquences sur l'atmosphère que celle du réchauffement. Les CFC, par exemple, ont été interdits car ils étaient responsables de la destruction d'une partie de la couche

d'ozone stratosphérique ; phénomène appelé aussi "le trou de la couche d'ozone". Voir aussi la FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère.

Cette lecture relative ne doit toutefois pas faire oublier **l'importance de l'effet du CO_2 qui reste le problème n°1 en ce qui concerne les gaz à effet de serre,** du fait de l'importance de ses émissions et de ses caractéristiques d'absorption des rayonnements. Voir aussi la FICHE 4 › Principes physico-chimiques impliqués dans l'effet de serre.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les gaz à effet de serre (GES) sont des constituants de l'atmosphère qui ont un pouvoir de réchauffement et un temps de résidence dans l'atmosphère différents les uns des autres. C'est grâce à ces gaz présents naturellement dans l'atmosphère que la surface de la Terre est à une température moyenne de 15°C rendant possible la vie sur Terre.

- Les gaz incriminés dans le réchauffement climatique sont d'origine anthropique. Ils sont émis par les activités humaines ou induits par le déséquilibre engendré par l'Homme. Ils agissent par effet additionnel à celui de l'effet de serre naturel.

- Le CO_2 et le CH_4 sont les principaux GES qui par la combinaison de leur quantité d'émission, leur durée de vie dans l'atmosphère, et de leur pouvoir de réchauffement, retiennent l'attention des travaux sur les émissions de GES.

PRINCIPES PHYSICO-CHIMIQUES IMPLIQUÉS DANS L'EFFET DE SERRE

Comprendre l'effet de serre et les déséquilibres introduits par l'Homme

Il est utile de comprendre les processus mis en jeu dans le fonctionnement de l'effet de serre pour saisir l'importance des effets directs ou combinés des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) et des aérosols.

La composition chimique de l'atmosphère est en effet au cœur de l'équilibre radiatif de la Terre et est déterminante pour sa température de surface. Cette température, qui influe elle-même sur la production même de ces gaz, entre alors dans des jeux d'influence et d'équilibre moteurs des cycles naturels de glaciation. Mais la concentration additionnelle de gaz à effet de serre est aujourd'hui d'une autre nature et l'émission par l'Homme de ces gaz à effet de serre vient contrarier ces équilibres naturels.

Cette fiche cherche à ouvrir à celui qui le souhaiterait quelques pistes pour mieux comprendre les principes physico-chimiques impliqués dans l'effet de serre et les différents statuts du CO_2 dans cet équilibre.

QU'EST-CE QU'UN RAYONNEMENT ?

C'est un transfert d'énergie. Chaque rayonnement est caractérisé par un spectre de longueurs d'onde qui est déterminé par la température de surface d'où est issue le rayonnement. Plus la température est élevée, plus la longueur d'onde correspondant au maximum d'intensité du rayonnement émis est courte *(Figure 10)*.

L'ABSORPTION DES RAYONNEMENTS PAR LES GES

Le Soleil et la Terre émettent un rayonnement. C'est l'absorption de ces rayonnements par les gaz présents dans l'atmosphère qui provoque le phénomène naturel d'effet de serre et rend possible la vie sur Terre.

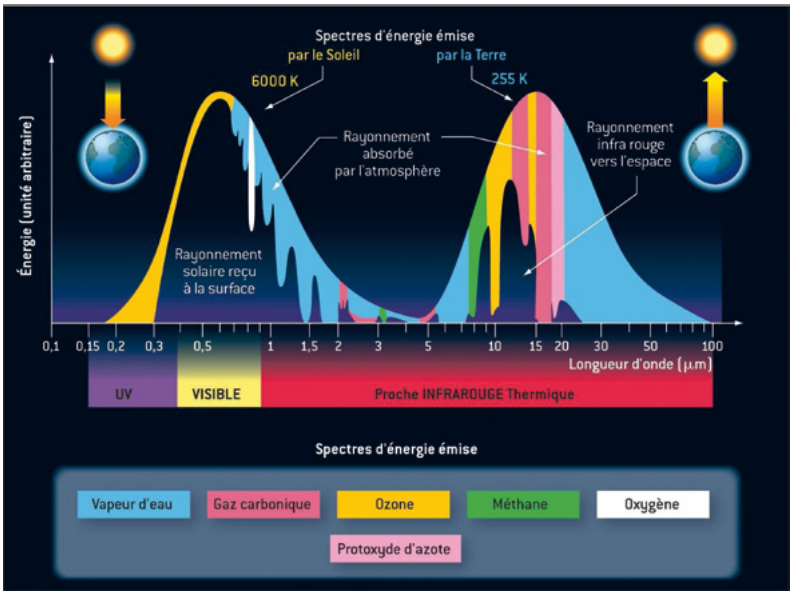
La température à la surface du Soleil est élevée (5726 °C), par conséquent la gamme de longueurs d'onde associée au rayonnement émis par le Soleil est une gamme de courtes longueurs d'onde qui va de 0,2 µm à 4 µm avec 50 % du rayonnement situé entre 0,4 et 0,7 µm. La Terre, quant à elle, est à une température de 15° C, sa longueur d'onde moyenne d'émission est de 15 µm mais sa gamme de longueur d'onde s'étend d'environ 7 µm à 50 µm.

Chaque GES absorbe les rayonnements à différentes longueurs d'onde, on appelle cela un spectre d'absorption. Ainsi, **le spectre d'absorption des GES est une explication fondamentale pour comprendre l'importance des GES, les uns par rapport aux autres, dans leur contribution au réchauffement de l'atmosphère** *(Figure 10)*.

Le rayonnement solaire est absorbé uniquement par deux gaz, l'ozone dans l'ultraviolet (ce qui permet la vie sur Terre) et la vapeur d'eau dans la fin du visible et le proche infrarouge. En revanche, dans le visible, gamme de longueur d'onde, de 0,4 à 0,7 µm, là où le soleil émet le plus de rayonnement, seulement une faible partie est absorbée. En conséquence, une grande partie du rayonnement solaire atteint la surface de la Terre, bien qu'il faille également tenir compte des phénomènes de réflexion et de diffusion dans l'atmosphère.

Le rayonnement de la Terre (tellurique) est absorbé par de nombreux

FIGURE 10 - Energie rayonnée par le Soleil (à gauche) et par la Terre (à droite) en fonction de la longueur d'onde.



D'après Delmas et al., 2007

gaz (vapeur d'eau, ozone, gaz carbonique (CO_2), protoxyde d'azote, méthane). Ces gaz absorbent partiellement ou totalement le rayonnement tellurique sur toutes les longueurs d'onde car, comme le montre la figure 10, chacun de ces gaz absorbe des longueurs d'onde différentes.

Cette complémentarité d'absorption des longueurs d'onde maintient la température à la surface de la Terre à environ 15°C. Sans ce phénomène, elle aurait été d'environ -18°C.

Sur ce principe, l'effet de serre additionnel augmente encore la température globale.

Le gaz carbonique (CO_2) absorbe principalement dans les longueurs d'ondes où le rayonnement émis par la surface terrestre est important (aux alentours de 15 microns). Dans ces longueurs d'onde, la radiation infrarouge émise par la surface terrestre est pratiquement totalement absorbée par le CO_2 atmosphérique alors que l'autre puissant gaz à effet de serre qu'est la vapeur d'eau n'intervient pas. C'est notamment à cause de cette spécificité et de l'importance des quantités injectées par l'Homme dans l'atmosphère que le dioxyde de carbone est le GES ayant le plus d'importance dans les stratégies et les discussions politiques alors que son pouvoir de réchauffement global (PRG) est nettement inférieur aux autres GES.

Comme les bandes d'absorption des autres GES sont situées là où l'intensité du rayonnement de la Terre (tellurique) est de faible importance *(Figure 10)*, leurs responsabilités dans l'effet de serre additionnel est moindre. De plus, leurs concentrations atmosphériques sont bien plus faibles par rapport au CO_2. Leurs rôles deviennent alors secondaires (Souchez, 2010).

C'est donc bien le spectre de longueurs d'onde d'absorption du dioxyde de carbone et d'autre part sa concentration plus importante, qui en font un puissant GES.

QU'EST CE QU'UNE RÉTROACTION POSITIVE ?

Souvent appelée "feedback", la rétroaction est une réaction d'un système à une entrée d'information. Elle est positive quand cette dernière en augmente l'effet. Quand la réaction se répète, la boucle de rétroaction peut entraîner son amplification continuelle.

LES EFFETS RÉTROACTIFS DU CO_2 ET DU CH_4

Des études ont montré qu'au début des périodes interglaciaires, le réchauffement a quelque peu précédé l'accroissement de la concentration en CO_2 *(Souchez, 2010)* **et en CH_4.** Les mesures réalisées sur l'évolution des signaux au cours de la dernière déglaciation indiquent que le CO_2 augmente avec un retard d'environ 900 ans sur le réchauffement enregistré dans la calotte antarctique *(Maréchal et Mélières, 2010).*

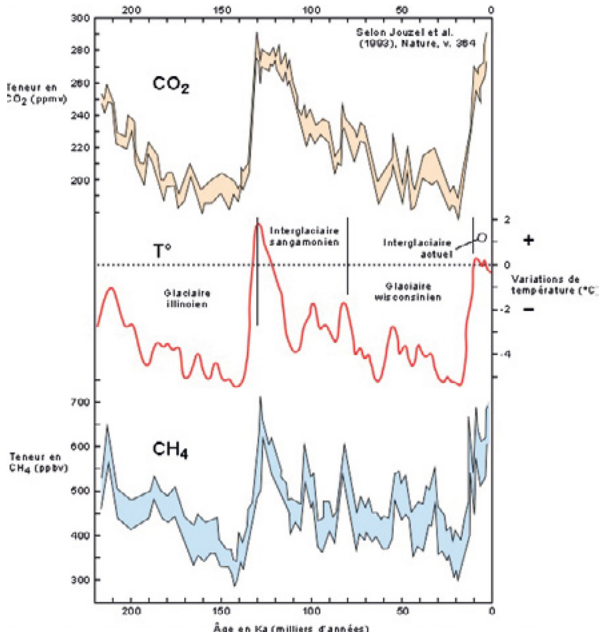
Le réchauffement initié par l'évolution des paramètres orbitaux entraîne une première série de relations causales qui amorce une sortie de glaciation *(Delmas et al., 2007)* :

- l'énergie reçue augmente aux hautes latitudes spécialement en été,
- la fonte de la neige d'été augmente par rapport à l'accumulation d'hiver,
- la surface occupée par les glaces diminue et donc l'albédo diminue.

Toutes ces relations causales induisent un réchauffement global et entraîne une réponse des cycles biogéochimiques. C'est la cas lorsqu'une partie du CO_2 stocké dans les océans est émis dans l'atmosphère suite à un nouvel équilibre entre l'atmosphère et l'océan. Cet accroissement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre - notamment en CO_2 et en CH_4, entraîne à son tour un réchauffement plus important *(Chappellaz et al., 2010)*. Ces modifications par rétroaction positive *(Tabeaud, 2010)* se poursuivent jusqu'à atteindre un nouvel équilibre.

Les corrélations fortes entre la courbe de température, la concentration en CO_2 et la concentration en CH_4, lors des périodes glaciaires-interglaciaires, s'expliquent ainsi *(Figure 11)*.

FIGURE 11 - Variation de la température, de la teneur en CO_2 (ppmv) et en CH_4 (ppbv) lors des 220 000 dernières années.



Les teneurs de CO_2 et CH_4 ont été obtenues par l'analyse des bulles d'air lors des carottages à Vostok. Les fluctuations de température sont indiquées selon leur variation par rapport aux températures de 1993

D'après Jouzel et al., 1993.

Ainsi, la Terre a sans cesse oscillé entre des périodes glaciaires (périodes froides) et des périodes interglaciaires (périodes chaudes). Il est vrai que, à une période glaciaire correspond un niveau faible de concentration en CO_2 (environ 180 ppm) et en CH_4 (300 ppb) et des températures plus basses, et à une période interglaciaire, un niveau élevé de CO_2 (280-300 ppm) et de CH_4 (700 ppb), d'autant plus élevé que la température est élevée *(Souchez, 2010).*

CONTRIBUTIONS RELATIVES DES FACTEURS NATURELS ET ANTHROPIQUES AU FORÇAGE RADIATIF ACTUEL

L'origine du réchauffement actuel n'est plus de même nature : "du statut de rétroaction, le rôle du CO_2 est passé à celui de forçage" *(Chappellaz et al., 2010).*

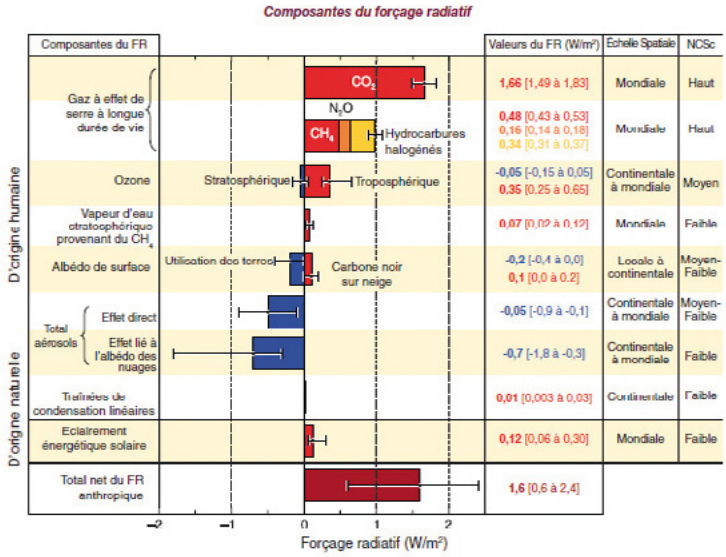
Le terme forçage est utilisé pour indiquer que l'équilibre radiatif de la Terre est en train d'être déstabilisé et le terme radiatif signifie que les facteurs modifient l'équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère. Le forçage radiatif peut être positif, s'il entraîne un réchauffement du système (ou une augmentation de l'énergie du système Terre/Atmosphère) et négatif lorsqu'il engendre une diminution de l'énergie et donc un refroidissement. Le forçage radiatif est exprimé en watts par mètre carré (W/m²) et il est quantifié comme "le taux de transfert d'énergie par unité de surface du globe" *(GIEC, 2007).*

La contribution de différents facteurs, qu'ils soient naturels ou anthropiques, au forçage radiatif actuel du système Terre/Atmosphère a été représentée dans la *figure 12.*

QU'EST-CE QUE LE FORÇAGE RADIATIF ?

C'est la mesure d'un changement de l'équilibre énergétique du système couplé Terre/Atmosphère. C'est précisément "la variation de rayonnement énergétique net (différence entre le rayonnement solaire descendant et le rayonnement infrarouge ascendant) […] due à une modification d'un agent externe du changement climatique, comme par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire" *(GIEC, 2007).*

FIGURE 12 - Forçages radiatifs (FR) moyens en 2005 par rapport à 1750 pour les agents et mécanismes importants.



A droite sont indiquées les meilleures estimations et les intervalles de confiance puis l'échelle spatiale et le niveau de compréhension scientifique (NCSc).

D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 2.20 .

QU'EST-CE QUE L'ALBÉDO?

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. "Les surfaces enneigées ont un albédo élevé […] et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible". *(GIEC, 2007)*

La contribution anthropique a été détaillée par le GIEC. L'effet des activités humaines depuis 1750 **a produit un forçage positif net de +1,6** [+0,6 à +2,4] W/m². Elle est majoritairement due aux émissions de GES. Le schéma montre bien les contributions différentes de ces GES, qui s'expliquent par leur concentration dans l'atmosphère et leur capacité d'absorption du rayonnement infrarouge terrestre. Notons aussi, l'influence de l'ozone troposphérique, des aérosols et de l'utilisation des terres ; facteurs pouvant être influencés par l'activité humaine, encore peu étudiés.

Les forçages radiatifs naturels positifs restent modestes (éclairement énergétique solaire, + 0,12 [+0,06 à +0,3] W/m²) **et sont même "compensés", par des forçages radiatifs naturels négatifs** (effet lié à l'albédo des nuages, - 0,7 [-1,8 à -0,3]).

CE QU'IL FAUT RETENIR

- A l'échelle glaciaire-interglaciaire, c'est le réchauffement planétaire (lié à des phénomènes de forçage radiatif externes) qui a précédé l'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère. Par "rétroaction positive" ce gaz (et les autres) ont alors contribué à l'effet de serre et à une augmentation accrue de la température à la surface de la Terre. Cet équilibre de température (autour de 15°C) résulte de l'absorption partielle des longueurs d'onde émises par les rayonnements solaire et tellurique (c'est-à-dire lié à la Terre) par les GES présents dans l'atmosphère.

- Alors que le soleil émet des rayonnements dans des longueurs d'onde où les principaux GES absorbent peu, les rayonnements liés à la Terre sont caractérisés par des longueurs d'ondes largement absorbées par ces mêmes GES (principalement le CO_2, c'est pourquoi ce gaz est un puissant GES).

- L'émission de GES par l'activité humaine vient bousculer l'équilibre naturel de l'effet de serre en renforçant l'absorption des rayonnements telluriques et donc le réchauffement. C'est pourquoi on parle désormais de forçage de l'équilibre radiatif du système Terre-Atmosphère par les GES d'origine anthropique (en particulier du CO_2).

PUITS DE CARBONE VERSUS SOURCES DE CARBONE

Comprendre le cycle du carbone et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre

Les principaux cycles biogéochimiques que sont les cycles de l'eau, de l'azote, du phosphore, du soufre et du carbone, permettent le passage alternatif des éléments entre milieu inorganique et matières vivantes. Ces cycles assurent la pérennité des écosystèmes et se traduisent par une remarquable constance du taux des divers éléments présents dans chaque milieu *(Ramade, 1991)*.

L'Homme, par son activité, contribue au fonctionnement de ces dispositifs naturels et en bénéficie. Sachant cela, il est usuel de penser que la nature saura compenser nos excès. Toutefois, concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique, cette thèse est encore une fois déboutée. Les émissions d'origine anthropique entrent dans ces cycles naturels. Une partie est absorbée mais les concentrations trop importantes viennent bousculer leur bon fonctionnement et contrarier les équilibres naturels. Ainsi la solution de séquestration du carbone proposée par certains voit déjà ses limites.

Cette fiche apporte des éléments de connaissance sur le cycle du carbone et permet de comprendre pourquoi il est important de ne pas le perturber.

LE CYCLE DU CARBONE : PUITS ET SOURCES NATURELS DE CARBONE

Le cycle du carbone décrit les échanges de carbone qui existent entre les différents réservoirs présents sur Terre. Le carbone est l'un des principaux éléments constitutifs des organismes vivants et il s'échange entre les divers composants de l'environnement.

Le cycle naturel du carbone est la conséquence d'une myriade de processus agissant à toutes les échelles de temps et d'espace. La *figure 13* présente le cycle biogéochimique du carbone, les puits, les sources et les flux. En l'absence de perturbation, ces processus définissent un cycle naturel avec un équilibre dynamique entre les sources et les puits *(Fellous et Gauthier, 2007)*. Par conséquent, le cycle du carbone, en l'absence de toute intervention humaine, se trouve déjà dans un état d'équilibre dynamique fragile entre les divers puits et sources *(Beniston, 2009)*.

QUELS SONT LES PRINCIPAUX RÉSERVOIRS DE CARBONE ?

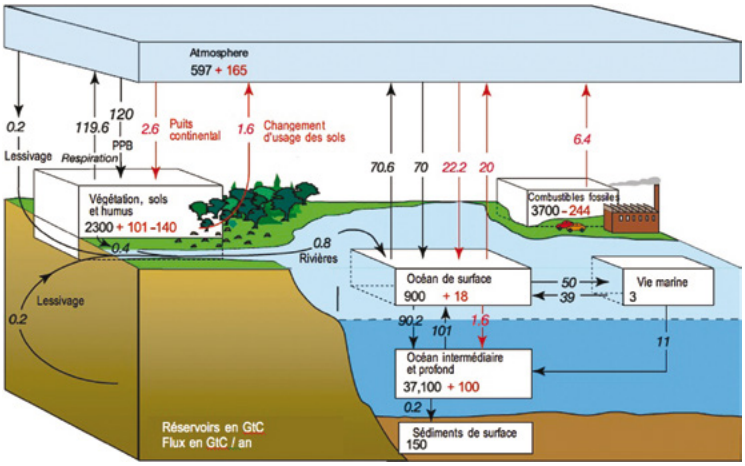
Les principaux réservoirs de carbone sont la biosphère (marine et terrestre (végétation et sol), l'hydrosphère (océans, eau douce), l'atmosphère et la lithosphère *(Beniston, 2009)*. Par une série de processus biologiques ou chimiques, appelés aussi **pompes biologiques ou chimiques**, le carbone peut être transporté entre ces différents réservoirs.

QU'EST-CE QU'UN PUITS DE CARBONE, DE MÉTHANE, OU D'UN AUTRE GAZ ?

Au sens large et dans ce contexte, un puits est un réservoir, naturel ou artificiel, qui absorbe un gaz présent dans l'atmosphère et donc contribue à diminuer sa quantité. Cette absorption recourt à des processus biologiques ou chimiques : on parle alors de pompe biologique ou de pompe chimique. A l'inverse, un réservoir qui émet plus de gaz qu'il n'en stocke est considéré comme une source.

Pour l'exemple du gaz carbonique, les principaux "puits" sont aujourd'hui les océans, les sols (humus, tourbière) et les forêts en formation. La photosynthèse intervient alors comme une pompe biologique. Remarquons que ces mêmes réservoirs sont également "sources" de gaz carbonique. Le rôle de ces réservoirs peut cependant varier dans le temps. Un réservoir qui était une source peut devenir un puits et vice-versa.

FIGURE 13 - Cycle biogéochimique du carbone



Les flux sont indiqués en GtC/an ; les contenus des réservoirs sont en GtC, avec en noir l'état préindustriel et en rouge la modification anthropique.

D'après : IPCC, 2007, WGII, Fig 1.3.

QU'EST-CE QUE LA PHOTOSYNTHÈSE ?

C'est un processus au cours duquel les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique. Ils utilisent l'énergie solaire, le CO2 et l'eau pour élaborer, dans leurs tissus, les matières organiques nécessaires à leur métabolisme et à leur croissance.

→ POMPES BIOLOGIQUES

La photosynthèse appelée aussi production primaire brute (PPB) est le principal processus qui permet aux végétaux de produire de la matière.

En absorbant du CO_2, la photosynthèse permet le stockage de 120 GtC/an *(Figure 13)*, provenant de l'atmosphère et permet aux plantes de vivre et grandir. Ce processus occasionne également une émission d'oxygène (O_2) dans l'atmosphère.

Inversement, la respiration est le processus par lequel les organismes vivants convertissent de la matière organique en dioxyde de carbone, rejetant de l'énergie et consommant de l'oxygène. Il existe deux types de respiration, la respiration autotrophe qui est la respiration des organismes photosynthétiques, c'est-à-dire des végétaux, et la respiration hétérotrophe qui est la conversion de matière organique en dioxyde de carbone par des organismes autres que les végétaux.
La respiration de la végétation et des sols rejette presque la même quantité de carbone que la photosynthèse en stocke (119,6 GtC/an pour la respiration contre 120 GtC/an pour la photosynthèse). *(Figure 13)*

L'océan joue un rôle majeur dans le cycle du carbone notamment par la photosynthèse assurée, par le phytoplancton *(Figure 13)*. L'océan peut aussi absorber le CO_2. Cette fonction est dépendante de sa température et de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Voir aussi la FICHE 8 › Changement climatique et océans. C'est **le second puits de carbone avec 70 GtC/an absorbé.**
La respiration existe aussi en milieu océanique. Les émissions de CO_2 varient alors selon l'activité photosynthétique des organismes de l'océan.

→ POMPES CHIMIQUES

Le carbone est soluble à des basses températures et des fortes pressions dans l'océan. Ce carbone absorbé par l'océan sous forme de CO_2 peut également être précipité en carbonate de calcium ($CaCO_3$). En effet, de nombreuses formes de vie marine sont capables d'extraire du carbone et de l'oxygène à partir de l'eau des océans (et des mers). Ils les combinent avec du calcium pour produire du carbonate de calcium ($CaCO_3$). Ce carbonate de calcium sert à la formation des coquilles et autres parties solides des organismes, elle est utilisée par de nombreux organismes (corail, palourde, huître…). Lorsque ces organismes meurent, leurs squelettes et autres parties solides se déposent au fond des océans.

La dissolution des carbonates a lieu sur terre mais aussi en milieu océanique. Par réaction avec l'eau, le carbonate de calcium stocké dans les roches sédimentaires peut libérer du CO_2 dans l'atmosphère. Dans l'océan, en deçà d'une certaine profondeur, la dissolution des carbonates, stockés dans les coquilles, s'effectue. Le taux de dissolution augmente alors avec la profondeur, selon la température et la pression. En combinant ce processus à l'activité photosynthétique des organismes, l'océan à température plus élevée émettra plus de gaz carbonique que l'océan à température plus basse.

La décomposition produit du dioxyde de carbone : Lorsque les plantes et les animaux meurent, ils subissent des processus chimiques qui dissocient les composés organiques de leur organisme en composés plus simples, notamment le CO_2. La décomposition est donc la transformation d'un composé en espèces chimiques plus simples sous l'influence de facteurs (lumière, humidité…) *(Bliefert et Perraud, 2004).*

D'autres sources mineures (éruptions volcaniques…) existent même si elles sont infimes comparativement aux principales sources naturelles et aux sources anthropiques.

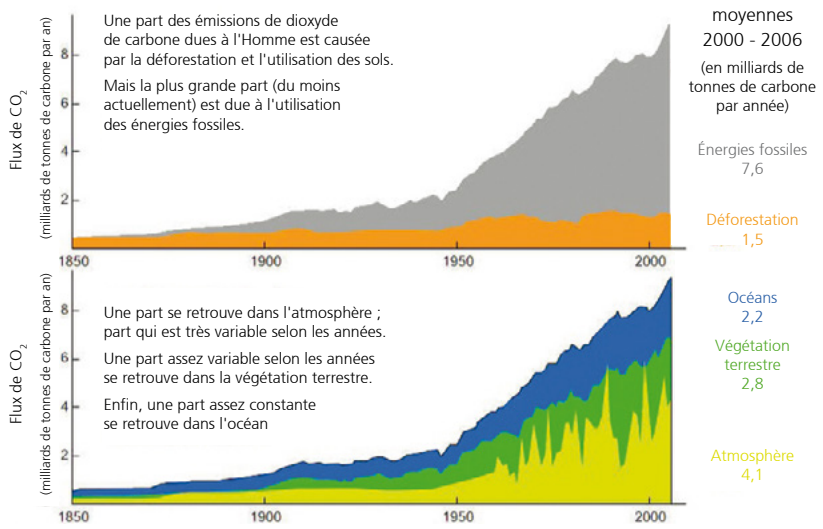
REPRISE DU CO_2 ADDITIONNEL (PRODUIT PAR L'HOMME) DANS LE CYCLE NATUREL DU CARBONE

Plus de 75 % des émissions de CO_2 d'origine humaine sont dus à la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), composés essentiellement de carbone. Une faible contribution provient des cimenteries [environ 5 %], qui émettent du CO2 par le broyage et la cuisson de roches carbonatées telles que le calcaire. Les changements d'affectation des sols (principalement le déboisement) sont responsables du reste *(GIEC, 2007)*.

La *figure 14* montre l'augmentation continuelle des émissions de CO_2 anthropiques en distinguant les émissions des énergies fossiles et de la déforestation. De plus, elle illustre l'absorption croissante par la végétation et les océans qui permettent de limiter l'augmentation de la concentration de CO_2 de l'atmosphère.

La nature absorbe une part non négligeable du CO_2 émis par l'Homme ainsi que la quasi-totalité du CO_2 que ses différents réservoirs émettent naturellement, soit chaque année près de 20 fois plus que le taux de CO_2 émis par l'Homme (Mélières et maréchal, 2010). Ainsi, "l'augmentation observée des concentrations de CO_2 atmosphérique ne révèle pas la totalité de l'impact des émissions d'origine anthropique. Elle ne prend en compte que 55 % du CO_2 dégagé par l'activité humaine depuis 1959 : le reste a été absorbé par les végétaux terrestres et les océans" *(GIEC, 2007)*. Sans cette atténuation, la concentration en CO_2 de l'atmosphère serait beaucoup plus importante.

FIGURE 14 - Sources de CO_2 dues à l'activité humaine (en haut) et portions absorbées par les puits de carbone (océans et végétation) et l'atmosphère (en bas)



D'après J. G. Canadell et al, PNAS, 2007

EN SAVOIR +

Le site de l'Institut Pierre Simon Laplace
http://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr

Ainsi, la concentration en dioxyde de carbone augmente en continu depuis le XIXème siècle, elle est passée de 280 ppm vers 1870 à 388 ppm en 2009 *(Académie des sciences, 2010)*. L'étude de l'évolution des différents isotopes du carbone dans l'atmosphère, l'étude de l'évolution des concentrations en dioxygène (O_2) de l'atmosphère et l'étude de la différence inter-hémisphérique permettent de conclure que **l'augmentation du CO_2 est incontestablement due à l'activité humaine**. Ce résultat a été validé par l'Académie des Sciences (2010).

QUE SONT DES ISOTOPES ?

Deux atomes sont dits isotopes s'ils ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

→ ETUDE DES ISOTOPES DU CARBONE

L'atome de carbone possède 3 isotopes :

- le carbone 12, le plus abondant, possède 6 protons et 6 neutrons,
- le carbone 13, isotope stable, possède 6 protons mais 7 neutrons. Il est plus abondant dans le carbone océanique et dans les émissions volcaniques ou géothermiques *(GIEC, 2007)*.
- le carbone 14, qui s'écrit également ^{14}C, possède 6 protons et 8 neutrons. Il est instable, c'est-à-dire radioactif et de période, demi-vie, de 5 730 ans *(Mélières et Maréchal, 2010)*. Cela signifie qu'au bout de 5 730 ans, la moitié d'un stock initial de carbone 14 a disparu. Il se désintègre en quasi totalité au bout de quelques dizaines de milliers d'années. Le carbone 14 se retrouve dans tous les composés carbonés sauf dans les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz). En effet, les combustibles fossiles se sont formés il y a au moins des millions d'années, ils ne contiennent donc plus de carbone 14. Il est important de préciser que les reconstitutions concernant le carbone 14 sont valables jusqu'aux années 1950, années à partir desquelles les tests thermonucléaires ont sévèrement perturbé la teneur de carbone 14 dans l'atmosphère (Mélières et Maréchal, 2010).

En analysant l'évolution de la composition du carbone dans l'atmosphère, plusieurs hypothèses permettent d'étayer la

conclusion que l'augmentation du carbone dans l'atmosphère est due aux activités humaines.

La photosynthèse privilégie l'incorporation de C12 ; donc les combustibles fossiles et les végétaux actuels contiennent moins de C13. Dès lors, les incendies de biomasse ont le même effet que la combustion des fuels fossiles. Ce n'est que grâce au C14 que l'on peut faire la différence entre rôle des fuels fossiles et rôle des incendies de biomasse actuelle car les fuels fossiles en sont dépourvus. Or, l'évolution en carbone 14 du CO_2 atmosphérique, enregistrée dans les plantes qui fixent ce gaz, en particulier les troncs d'arbres, montre une décroissance du contenu de l'atmosphère en ^{14}C, corrélées avec l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère. Cette observation indique que le CO_2 supplémentaire injecté dans l'atmosphère ne contient pas de ^{14}C » *(Mélières et Maréchal, 2010)*. Autrement dit, ce CO_2 atmosphérique supplémentaire provient de la combustion de fuels fossiles.

L'appauvrissement du CO_2 atmosphérique en carbone 13 indique également que l'augmentation de ce CO_2 ne provient pas de l'océan.

→ ETUDE DE LA DIMINUTION DE LA CONCENTRATION EN DIOXYGÈNE (O_2)

On constate que la moyenne annuelle de la teneur en O_2 diminue continuellement de façon synchrone avec l'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère. Or, si l'augmentation de CO_2 provient d'émission par les volcans ou si elle résulte de transformations de roche carbonatée, il n'y a aucun impact sur la concentration de l'atmosphère en oxygène car ces processus ne mettent pas en jeu une consommation d'oxygène. En revanche, si l'augmentation de CO_2 provient d'une combustion de matière organique (combustibles fossiles et déforestation), celle-ci doit consommer de l'oxygène (car il y a une oxydation de la matière carbonée) *(Mélières et Maréchal, 2010)*. Donc, l'oxygène s'appauvrit lors de la combustion de combustibles fossiles. En conséquence, **si la teneur en oxygène diminue, cela signifie que le CO_2 supplémentaire provient de la combustion de matière organique.**

→ ETUDE DE LA DIFFÉRENCE INTER-HÉMISPHÉRIQUE

Un décalage temporel est constaté entre l'évolution de la quantité (moyennée sur l'année) de CO_2 présente dans les deux hémisphères (Nord et Sud). On constate un retard de l'augmentation du contenu en CO_2 de l'hémisphère sud sur l'hémisphère nord de l'ordre de l'année. Les principales émissions se faisant dans l'hémisphère nord, […] le temps que prend le transfert de ce surplus de CO_2 vers l'hémisphère sud est déterminé par le temps de mélange de l'atmosphère entre les deux hémisphères, qui est de l'ordre de l'année *(Mélières et Maréchal, 2010)*.

L'augmentation du CO_2 atmosphérique est un fait absolument incontestable, que l'on peut attribuer avec une certitude absolue aux activités humaines *(Le Treut, 2009)***. Cependant, les émissions anthropiques ne se retrouvent pas entièrement dans l'atmosphère, le cycle naturel du carbone en intègre une partie, que ce soit par l'intermédiaire de l'océan ou de la végétation** (*Figure 14, graphique du bas).*

LIMITES DES SOLUTIONS DE SÉQUESTRATION DU CARBONE PAR LES POMPES NATURELLES

L'augmentation de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère a atteint ces dernières années 1,9 ppm par an *(Maréchal et Mélières, 2010)*, et réduire l'augmentation de la concentration atmosphérique par les puits naturels de carbone apparaît sous de nombreux points de vue (économique, environnemental, et agronomique par exemple) comme une solution avantageuse d'atténuation des concentrations des GES atmosphériques. Le protocole de Kyoto a d'ailleurs prévu la possibilité de prendre en compte les puits de carbone résultant des politiques volontaires d'afforestations […] ou de déforestations. Mais comme les paragraphes suivants permettent de le comprendre, il reste de nombreuses sources d'incertitudes quant à la réussite de ces solutions.

→ DES EFFETS LIMITÉS ET INCERTAINS DANS LE TEMPS

La première source d'incertitude provient de la possibilité de bascule de ces puits naturels de carbone en sources. Cela a déjà été le cas puisqu'aux "années chaudes correspondent en général des sources anormales de CO_2 alors que les années froides donnent lieu à des puits plus intenses que la moyenne" *(Ducroux et al., 2001)*. Compter uniquement sur cette approche pourrait alors s'avérer risqué sur le long terme, les conditions météorologiques pouvant favoriser l'inversion des puits de carbone en sources. D'autre part, les réservoirs à saturation largueront eux-mêmes du CO_2 additionnel.

La deuxième source d'incertitude est politique. Le choix des territoires déterminants pour la création de ces puits de carbone va, s'il s'agit de plantations "geler des terres au détriment des populations locales" *(Locatelli et Loisel, 2002)*. Cela peut impliquer des problèmes socio-économiques et des possibles dérives colonialistes *(Karumbidza et Menne, 2010)*.

Enfin, notons que d'autres effets collatéraux peuvent exister. Par exemple, le remplacement des divers écosystèmes par des monocultures efficaces en termes d'absorption de CO_2 a pour conséquence une perte de biodiversité. Par ailleurs, "La permanence d'un puits peut être mise en péril par de nombreux facteurs physiques (feux, ravageurs), politiques ou économiques" *(Locatelli et Loisel, 2002)* qui peuvent aussi bien être naturels (feux de forêts naturels, grande chaleur) qu'humains (guerre, incendie criminel, changement de politique, urbanisation…).

→ DES SOLUTIONS QUI NE PRENNENT PAS EN COMPTE LES AUTRES GES ET TOUTES LES INTERACTIONS

Dans le cas de la séquestration par les sols et les plantes, la seule prise en compte du stockage de carbone sous l'effet du mode de gestion des terres comme une solution au réchauffement global est insuffisante et l'on doit considérer très fortement les options qui permettent de diminuer aussi les flux de N_2O et CH_4. Le N_2O, par exemple, même s'il est à concentration moindre dans l'atmosphère, a un potentiel de réchauffement global (PRG) beaucoup plus important.

Ces gaz interviennent eux aussi dans le fonctionnement des sols. Le CH_4 entre en jeu dans le cycle du Carbone, quant au N_2O, il participe aux autres cycles biogéochimiques en particulier le cycle de l'Azote. Les interactions entre cycles sont aussi à considérer. Voir aussi la FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère. La totalité des flux des différents GES doit être prise en compte pour estimer l'efficacité des puits.

Cette approche de création de puits de carbone ne doit donc pas remplacer la seule solution réellement efficace : la réduction des émissions à la source.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- La stabilité relative du CO_2 dans l'atmosphère est rendue possible par des processus d'échange des gaz entre différents réservoirs de la biosphère (végétation, océans, sols, atmosphère).

- Le cycle du carbone fait intervenir des processus tels que la photosynthèse ou la dissolution du carbone dans les eaux à basse température des océans qui soulagent l'atmosphère d'une concentration trop importante de CO_2. Mais d'autres processus tels que la respiration, la décomposition, la dissolution des carbonates libèrent du CO_2 dans l'atmosphère. Naturellement, un équilibre dynamique se crée entre ces différents échanges.

- L'étude des caractéristiques des composés carbonés confirme à la fois l'origine anthropique de l'augmentation de CO_2 de ces derniers (100 ans) mais aussi la reprise par les cycles naturels d'une part non négligeable du CO_2 émis par l'Homme. Cette reprise importante vient perturber les équilibres et risque de faire basculer les puits de carbone en sources, entrainant ainsi une aggravation des phénomènes en cours.

- Cette connaissance et les zones d'ombres sur les interactions entre les différents cycles biogéochimiques encouragent à adopter des stratégies de réduction des émissions de GES à la source.

EFFETS DU CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES ET DE L'AGRICULTURE

Comprendre l'importance du changement d'affectation des terres sur le climat

Le changement d'affectation des terres désigne, d'après le GIEC (2007), un changement apporté par l'Homme dans l'utilisation ou la gestion des terres qui peut entraîner une modification de la couverture terrestre.

Qu'il soit temporaire ou définitif, ce changement a des conséquences souvent irréversibles sur l'environnement et les changements de grande ampleur peuvent aussi avoir une influence sur le climat global. Ainsi, les grandes périodes de déforestation et de développement de l'agriculture ont marqué la composition de l'atmosphère.

Cette fiche présente les principaux changements d'affectation des terres qui ont émis ou émettent encore d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES).

L'INFLUENCE DE L'ÉVOLUTION DÉMOGRAPHIQUE

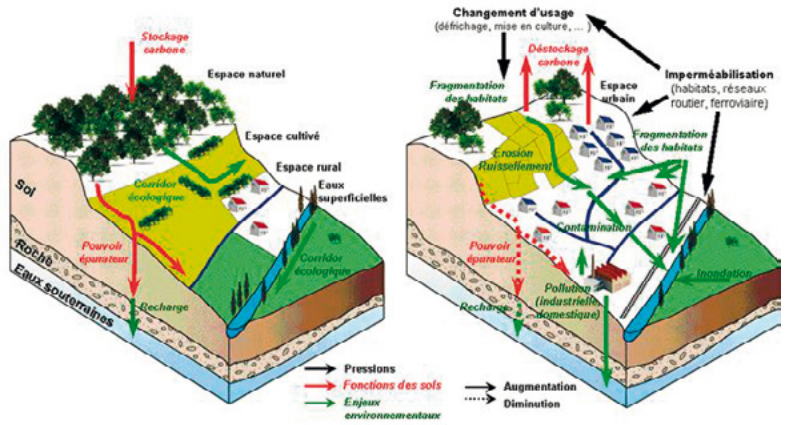
Alors que le changement d'affectation des terres, initié par l'agriculture, existe depuis des milliers d'années, la faible population de l'époque ne permettait pas une modification significative de l'utilisation des sols *(Souchez, 2010)*. En 1750, la population était de 750 millions et de 954 millions en 1800 donc jusqu'au XIXème siècle, la population mondiale était inférieure à 1 milliard d'habitants. Entre 1900 et 2010, la population passe de 1,65 milliards à 6,9 milliards. Cela fait une augmentation de 315 % lors des cent dix dernières années *(Dumont, 2010)*.

L'évolution démographique se caractérise aussi par un développement urbain favorisant l'artificialisation des sols. Ces changements de couvert ont plusieurs conséquences :

- **La régression de la biodiversité** due à la fragmentation des milieux et à la destruction des habitats des espèces animales et végétales.
- **L'émission de grandes quantités de CO_2.** Les végétaux sont capables d'absorber et stocker du CO_2, donc la déforestation ou la réduction des surfaces végétales provoque un déstockage de carbone et limite les puits de carbone. En outre, l'étalement urbain favorise les transports fortement émetteurs de gaz à effet de serre.
- **Les modifications des conditions hydrologiques locales,** voire même une modification des relations entre les grands réservoirs (biosphère, océan, atmosphère, lithosphère…) à l'échelle de la planète. Sur un sol bitumé, l'eau ruisselle davantage, s'infiltre moins, ce qui augmente les risques d'érosion et d'inondation. Plus concentré, ce ruissellement peut favoriser le transfert de sédiments contenant des polluants vers les cours d'eau : engrais, pesticides, métaux lourds, hydrocarbures.
- **L'érosion et la perte de valeur agronomique des sols** dans certains cas.

D'après Maréchal et Mélières (2010), la maîtrise de la croissance de la population mondiale est un facteur fondamental de la maîtrise des émissions de GES.

FIGURE 15 - Impacts de l'artificialisation des sols sur les habitats et les cycles du carbone et de l'eau



D'après SOeS-Gis Sol, 2010

LA DÉFORESTATION

Les évolutions ne sont pas les mêmes pour toutes les forêts du monde. En effet, les forêts tropicales régressent fortement alors que d'autres types de forêts, notamment la forêt tempérée située dans des pays développés, se stabilise, voire progresse. Deux chiffres le montrent :

- entre 1990 et 2000, 91,5 % de la perte nette des forêts concernaient les forêts tropicales.
- "l'évolution de la forêt en France métropolitaine est passée de 7,5 millions d'hectares en 1800 à 11,5 millions d'hectares en 1950 et a encore augmenté pour atteindre 15 millions d'hectares en 2001." *(Saugier, 2006)*.

Concernant les forêts tropicales, une des raisons principales de la déforestation, en plus de l'augmentation de la population, est due à la richesse de ces forêts. En effet, les forêts tropicales sont riches en bois précieux (tek, acajou, balsa). Ces bois précieux sont "surexploités dans un commerce avec les pays développés" *(Beaux, 2004)*. Par ailleurs, la déforestation est également due au besoin d'une superficie toujours plus grande de terres cultivables. Mais, l'une des causes principales est l'exploitation du bois comme chauffage. En effet, notamment dans les pays en développement, le bois constitue une source d'énergie importante et les besoins énergétiques sont amplifiés par la croissance démographique *(Beaux, 2004)*.

La déforestation engendre la régression de la biodiversité en détruisant les habitats des espèces. Ainsi, "de 4000 à 6000 espèces animales et végétales seraient perdues chaque année" *(Beaux, 2004)*.

D'autre part, les changements d'affectation des terres favorisent l'émission de grandes quantités de CO_2, à travers la déforestation, et la diminution de la capacité d'absorption du CO_2 liée à la réduction de la quantité de végétaux.

Enfin, ils peuvent avoir une incidence sur l'albédo (réflexion des sols), l'évapotranspiration, les propriétés des sols. Cela peut localement modifier les conditions climatiques (réchauffement des sols, réduction des précipitations…).

L'IMPACT DE L'AGRICULTURE

C'est à partir de la révolution agricole[2] que l'agriculture a commencé à avoir un impact significatif sur le climat. En effet, l'agriculture est née il y a environ 10 000 ans avec la révolution néolithique, passage d'une économie vivrière basée sur la chasse, la pêche et la cueillette à une économie agricole et d'élevage, où l'Homme intervient dans les cycles naturels de la biomasse. Cependant, à cette période, la population était trop peu nombreuse et les techniques trop rudimentaires pour avoir une influence significative sur le climat et sur les émissions de GES. La principale caractéristique de la révolution agricole fut d'accroître radicalement la productivité de la culture et de l'élevage. Cet accroissement s'est fait par la mise en place d'un système basé sur la culture intensive et sur la recherche de forts rendements.

L'agriculture est le troisième secteur émetteur au niveau mondial. Le changement d'affectation des terres et la déforestation sont responsables de la hausse la plus significative des émissions depuis 1990 de ce secteur (+48%). En 2011, le secteur agricole est responsable de 20% des émissions de GES en France, il est le deuxième secteur émetteur après les transports (26%).

Alors que l'agriculture n'est que très peu émettrice du principal GES responsable du changement climatique, le dioxyde de carbone (CO_2) (seulement 8%), elle émet, en revanche, de grandes quantités de deux autres GES : le méthane (CH_4),41% des émissions agricoles - et le protoxyde d'azote (N_2O),51%.

Les émissions de CH_4 proviennent en grande partie du processus de digestion des ruminants (bovins et ovins) alors que les émissions de N_2O proviennent principalement de la transformation microbienne de fertilisants azotés dans les sols. L'agriculture, que ce soit à travers l'intensification des cultures ou le développement de l'élevage, participe au changement climatique. La méthanisation agricole des rejets ou encore l'utilisation raisonnée, voire l'abandon, des engrais chimiques azotés limitent ces émissions.

Pourtant, le maintien d'un appareil productif agricole doit être un objectif majeur pour les pays européens. Car la sécurité alimentaire, mise à mal à la fois par l'effet du changement climatique sur la remontée de la désertification et par une augmentation de la population mondiale, est une priorité au niveau planétaire.

EN SAVOIR +

Agriculture et gaz à effet de serre : état des lieux et perspectives, RAC France, 2010
www.rac-f.org/Agriculture-et-gaz-a-effet-de

L'agriculture européenne – relever le défi du changement climatique, Commission européenne Direction générale de l'Agriculture et du Développement Rural, 2008
http://ec.europa.eu/agriculture/publi/fact/climate_change/leaflet_fr.pdf

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Par son action de déforestation et sa pratique de l'agriculture, l'Homme a induit des changements dans la composition de l'atmosphère dès la préhistoire. Mais le faible taux de population et le faible impact des techniques ne rendaient pas significatif cette empreinte.
- A partir de 1750, l'action massive de déforestation, conjuguée à l'augmentation de population, puis à l'utilisation de pratiques d'agriculture intensive ont, par contre, eu des effets très significatifs. Le changement d'affectation des terres et la déforestation sont responsables de la hausse la plus significative des émissions depuis 1990 par secteur (+48%).
- Le secteur agricole est aujourd'hui le troisième secteur émetteur au niveau mondial et le second en France.

[2] La révolution agricole désigne les grands bouleversements de la technique et des usages agraires qui ont marqué l'avènement des pratiques de l'exploitation contemporaine.

EFFETS COMBINÉS DE L'ACTION DE L'HOMME SUR L'ATMOSPHÈRE

Savoir considérer les interactions entre problématiques environnementales

Dégradation de la couche d'ozone, pluies acides, nuages de particules, sont autant de maux de l'atmosphère liés à l'action de l'Homme. Mais ces problématiques environnementales a priori indépendantes peuvent interférer avec la question climatique à travers le phénomène de l'effet de serre.

Les effets combinés de ces problématiques peuvent parfois dans certaines conditions et à certains points du globe sembler positifs, mais sont souvent plutôt aggravants. Dans tous les cas, savoir considérer les phénomènes dans leur globalité, aide à comprendre pourquoi il est nécessaire de recourir à des solutions inspirées par le respect des équilibres naturels.

Cette fiche explique deux problématiques et décrit leur principale interaction avec le phénomène de réchauffement planétaire.

DÉGRADATION DE LA COUCHE D'OZONE EN ANTARCTIQUE ORIENTALE

Ne pas confondre :

- **La pollution à l'ozone : il s'agit de l'ozone troposphérique qui est formé dans la troposphère par réaction photochimique,** lors d'interactions entre les rayonnements ultra violets (UV) solaires et des polluants primaires précurseurs. Les polluants primaires précurseurs de l'ozone troposphérique peuvent être les oxydes d'azote, le méthane, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures… L'ozone situé dans la troposphère ne représente que 10% de la quantité totale de l'ozone atmosphérique et il est néfaste pour la santé. En effet il peut endommager les voies respiratoires.
- **et le "trou" de la couche d'ozone : il s'agit de la dégradation de l'ozone stratosphérique.** A contrario, l'ozone stratosphérique est bénéfique puisqu'il est la seule substance de la stratosphère à absorber le rayonnement solaire dont la longueur d'onde est comprise entre 0,20 et 0,31 µm. Ainsi, il protège les plantes, les animaux et les hommes des rayons UV du soleil. L'ozone stratosphérique représente 90% de l'ozone atmosphérique *(Bliefert et Perraud, 2004)*. Voir aussi la FICHE 3 › Gaz à effet de serre et aérosols.

QU'EST-CE QUE L'OZONE ?

C'est un gaz à effet de serre secondaire (O_3), c'est-à-dire qu'il n'est pas émis directement dans l'atmosphère mais qu'il y est formé. La dégradation de la couche d'ozone concerne l'ozone stratosphérique et non l'ozone troposphérique. Il n'y a pas deux ozones, mais les conditions physiques de la troposphère et de la stratosphère étant différentes, les réactions impliquant l'ozone sont différentes.

→ LA FORMATION DE L'OZONE STRATOSPHÉRIQUE ET DU "TROU" DE LA COUCHE D'OZONE

Le cycle de Chapman est le cycle naturel de formation et destruction de l'ozone stratosphérique. A cette altitude, l'ozone est produit à partir de la recombinaison entre une molécule d'oxygène et un atome d'oxygène, produit par photolyse d'une autre molécule d'oxygène (O_2) à des longueurs d'onde de 0,25 µm (réaction chimique dans laquelle un composé chimique est décomposé par la lumière). Ces molécules d'ozone créées sont également détruites par photolyse pour redonner du dioxygène et de l'oxygène. Ce cycle s'équilibre entre forma-

tion et destruction. Or, les scientifiques se sont aperçus que les teneurs en ozone mesurées étaient bien plus faibles que les teneurs en ozone calculées. Cela signifie qu'un autre mécanisme de destruction de l'ozone entre en jeu.

Cet autre mécanisme de destruction est un cycle catalytique faisant intervenir des espèces chimiques, présentes dans la stratosphère qui réagissent avec O_3 de telle façon qu'elles se retrouvent elles-mêmes inchangées après avoir transformé O_3 en O_2. Elles agissent donc comme des catalyseurs et peuvent immédiatement s'engager dans de nouvelles réactions. Les chlorofluorocarbures (CFC), dont aucune source naturelle n'est connue *(Bliefert et Perraud, 2004)*, permettent aussi la destruction de l'ozone stratosphérique. L'Homme, en émettant des CFC, a fortement modifié l'équilibre naturel de formation/destruction de l'ozone et par une diminution importante de la quantité d'ozone aux pôles, des « trous » se sont formés. Le protocole de Montréal (1987) en interdisant l'utilisation de CFC est une réponse mondiale à ce problème.

Pour que le « trou » de la couche d'ozone se forme, il faut en plus des processus chimiques, des processus météorologiques dynamiques particuliers (très basses températures et formations de nuages stratosphériques) *(Faucheux et Noël, 1990)*. C'est l'interdépendance des facteurs qui engendrent le "trou" de la couche d'ozone. Quand on parle "du" trou dans la couche d'ozone, on parle généralement de celui situé en Antarctique, et plus précisément l'Antarctique orientale. Celui-ci est en effet plus important qu'en Arctique. Ce sont les nuages stratosphériques polaires et une température inférieure à -78°C dans la stratosphère antarctique qui accentuent la destruction de l'ozone au printemps au moment où il y a à nouveau irradiation solaire, mais le "trou" se comble ensuite. Il n'est pas permanent. En effet, en hiver, dans l'hémisphère sud (juin-septembre), se met en place un tourbillon polaire (ou vortex polaire) et des nuages stratosphériques polaires peuvent se former dans ce vortex, à la condition que la température soit inférieure à -78°C. Ces nuages favorisent la destruction de l'ozone stratosphérique par les CFC principalement et contribue à l'accroissement du "trou" de la couche d'ozone *(Souchez, 2010)*.

→ LE "TROU" DE LA COUCHE D'OZONE ET SES CONSÉQUENCES SUR LE REFROIDISSEMENT D'UNE PARTIE DE L'ANTARCTIQUE

L'Antarctique orientale s'est refroidie et il est observé, "depuis 1979, date des premières observations satellitaires, une légère extension de la banquise Antarctique" *(Souchez, 2010)* alors que dans le même temps d'après Souchez (2010), la superficie de la banquise Arctique est passée d'environ 7,2 millions de km² en septembre 1979 à environ 5,2 millions de km² en septembre 2009. La banquise de l'Antarctique orientale, quant à elle, ne diminue pas car la diminution de l'ozone entraîne un refroidissement de la stratosphère à ce niveau. Ce refroidissement se propageant à la haute troposphère - puisque l'air plus froid descend et l'air plus chaud monte – crée un gradient horizontal de pression entre l'Antarctique orientale et les régions de latitude moins élevée qui s'accentue, entraînant l'intensification de la circulation d'air dans le vortex, la diminution des échanges thermiques et donc un plus grand isolement du continent.

Le protocole de Montréal (1987), qui interdit l'utilisation des CFC, est un évènement exceptionnel. Pour la première fois, des Etats se sont mis d'accord pour gérer ensemble une présomption de risque à l'échelle de la planète. Il est une réponse économique à un problème écologique. Il est le reflet de la capacité des acteurs à résoudre un problème global d'environnement tout en satisfaisant leurs intérêts particuliers et on s'attend à ce que la couche d'ozone retrouve son aspect d'avant 1980 vers 2060-2075 *(PNUE, 2010)*.

Cependant, à la suite de cette réussite, l'influence de l'accroissement de la concentration des GES dans l'atmosphère ne serait plus inhibé par le rôle du trou d'ozone et un réchauffement généralisé en Antarctique orientale pourrait se produire *(Souchez, 2010)*.

LES PLUIES ACIDES DANS LES RÉGIONS SEPTENTRIONALES

Les processus les plus importants qui permettent à l'atmosphère de s'auto-épurer sont les pluies et les précipitations. Par ces processus, tous les composés solubles dans l'eau sont de nouveau transportés de l'atmosphère à la Terre. Les pluies « propres », ne contenant principalement que du CO_2 comme gaz susceptible de modifier la valeur du pH, devrait avoir une valeur de pH comprise entre 5 et 5.6 *(Bliefert et Perraud, 2004)*. Les pluies naturelles sont donc légèrement acides du fait de la dissociation du CO_2. Une pluie est considérée comme acide lorsque son pH est inférieur à 5.

→ ORIGINE ET PRINCIPALES INCIDENCES DES PLUIES ACIDES

Les émissions anthropiques sous l'effet des réactions chimiques mises en jeu dans l'atmosphère aboutissent à la formation de deux acides : l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide nitrique (HNO_3). Ces acides se déposent lors des précipitations à la surface de la Terre sur les végétaux, les sols ou les eaux de surface (lacs, mer, rivière…). Ils ont alors trois principaux impacts :

- l'acidification de nombreux lacs : l'importance de ces impacts varie selon la nature et les propriétés des lacs. A terme, l'acidification des eaux peut engendrer la mort écologique du lac,
- le dépérissement des forêts,
- la dégradation des pierres des bâtiments et des monuments historiques comme l'acropole d'Athènes par exemple. De même, les pluies acides sont responsables d'une érosion des surfaces métalliques (cuivre, zinc ...).

→ L'INCIDENCE DES PLUIES ACIDES SUR LA PRODUCTION DE MÉTHANE DES RÉGIONS SEPTENTRIONALES

Les pluies acides furent l'un des premiers problèmes écologiques transfrontaliers découverts par les sociétés. Elles touchent de nombreuses régions mais ne sont pas considérées comme une véritable pollution planétaire, puisqu'elles ne modifient pas le fonctionnement du système-Terre dans son ensemble *(Faucheux et Noël, 1990)*.

Pourtant, cette pollution, qui dépasse le niveau local ou régional, se situe à un niveau intermédiaire et touche des zones géographiques particulièrement importantes du point de vue des émissions de méthane. Il s'agit des régions septentrionales de l'Eurasie, qui caractérisées par la présence de sols gelés en permanence (permafrost), de marécages et de tourbières subarctiques, sont soumises à la fois au réchauffement et aux pluies acides. Par l'effet du réchauffement, la fonte d'une partie de la glace présente dans les sols gelés (permafrost) des régions septentrionales de l'Eurasie provoque des lacs temporaires dits thermokarstiques. A l'instar des marécages et tourbières subarctiques, ces lacs, récemment étudiés, ont la particularité de libérer des quantités non négligeables de méthane, puissant GES.

Or il a été constaté que des sulfates venus se déposer sur les zones humides (marécages, tourbières, subarctiques…), par l'intermédiaire des pluies acides, limitent leurs émissions de méthane.

QU'EST-CE QUE LE pH ?

C'est la mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) en solution, soit littéralement le potentiel Hydrogène. Une solution neutre a un pH de 7. Quand la concentration en ions H^+ augmente, le pH diminue. Il peut être inférieur à 7 et la solution est dite acide. Inversement, au-dessus de 7, la solution est classiquement dite basique ou alcaline (ancienne terminologie).

QU'EST-CE QUE LES PLUIES ACIDES ?

"L'expression "pluies acides" (acid rain) désigne, stricto sensu, l'acidification de l'atmosphère due à l'Homme et résultant de l'augmentation des émissions d'oxyde de soufre, SO_2, ainsi que d'oxydes d'azote, NOx (plus précisément NO et NO_2)" *(Faucheux et Noël, 1990)*. Ces composés (SO_2, NO, NO_2...), émis directement ou produits en réaction dans l'atmosphère, acidifient les pluies. Ils proviennent essentiellement des transports, des centrales thermiques, des industries…

En effet, à la suite d'expériences, il a été démontré que "la réduction des émissions de méthane croît lorsque le dépôt des sulfates […] augmente" *(Souchez, 2010)*.

Ce concours de circonstance ne saurait faire oublier que le réchauffement climatique et les pluies acides restent des problématiques environnementales majeures auxquelles nous devons trouver des solutions efficaces à l'échelle planétaire.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Il est reconnu que le réchauffement climatique serait très directement lié aux émissions anthropiques de GES. Ce phénomène ne doit pas être confondu avec d'autres problématiques environnementales telles le « trou » dans la couche d'ozone par exemple.

- Certains effets de ces problématiques peuvent se conjuguer. Ainsi, la relative extension de la banquise Antarctique, malgré le réchauffement climatique, serait favorisée par la persistance du "trou" dans cette région.

- Le phénomène de pluies acides interfère, quant à lui, en limitant les émissions de méthane des lacs temporaires, marécages et tourbières nés du réchauffement des sols gelés dans les régions septentrionales.

- La connaissance de ces effets combinés, même s'ils sont plutôt ici favorables, aide à comprendre la complexité dans laquelle évolue le scientifique et doit encourager à rester prudent sur la généralisation de grands principes et de solutions hâtives. Encore une fois, le recours à des stratégies de développement respectueuses du fonctionnement des écosystèmes semble être la meilleure voie.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET OCÉANS

Apprécier le rôle fondamental des océans dans la régulation du climat

Saisir l'évolution que subit l'océan depuis les dernières décennies et en comprendre les causes est particulièrement important pour comprendre le changement climatique. Ainsi, l'Homme doit continuer à améliorer sa connaissance des grands phénomènes naturels afin d'agir en connaissance de cause.

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques dans l'atmosphère a des conséquences importantes sur l'équilibre du couple océan/atmosphère et sur la composition chimique de l'océan (acidification). Le changement climatique en cours modifie également les températures de l'océan, avec en particulier des conséquences sur le niveau des mers et la circulation océanique. Cette compréhension des phénomènes est particulièrement complexe, car on sait par exemple que, même si le bilan ne peut être donné actuellement avec précision, l'océan, considéré traditionnellement comme un puits de CO_2, émet du CO_2 vers l'atmosphère dans certaines zones et absorbe du CO_2 atmosphérique dans d'autres.

Cette fiche explique les impacts du changement climatique sur les océans et les limites du service qu'ils peuvent rendre comme puits naturels de carbone.

LES EFFETS DE L'AUGMENTATION DE LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE EN CO_2 SUR LES OCÉANS

→ AUGMENTATION DE L'ABSORPTION DU DIOXYDE DE CARBONE PAR LES OCÉANS

L'océan possède une capacité à absorber une partie du dioxyde de carbone injecté dans l'atmosphère par les activités humaines. Les différents gaz de l'atmosphère se dissolvent en partie dans l'eau de l'océan, de manière à ce que leurs pressions partielles, dans l'air et dans l'eau, s'équilibrent. Ainsi, lorsque la pression partielle du CO_2 dans l'atmosphère augmente, un transfert se met en place de manière à rééquilibrer les pressions partielles des deux réservoirs. Ce phénomène permet à l'océan d'augmenter sa capacité d'absorption en CO_2 et ce, même si la température de l'océan augmente.

Lorsque l'équilibre de départ est modifié, l'océan a un rôle de régulateur biogéochimique qui permet à un nouvel équilibre de s'instaurer. Par exemple, si instantanément, on injectait autant de dioxyde de carbone dans l'atmosphère que ce qu'il contient, sa teneur en CO_2 doublerait (de 360 à 720 ppm). Mais les simulations prévoient que l'océan absorberait les trois quarts du carbone excédentaire, la concentration de CO_2 de l'atmosphère se fixant à 450 ppm (Jacques et Saugier, 2008). Pour observer ce retour à un équilibre entre les deux réservoirs, d'après Jacques et Saugier (2008), il faudra attendre… un bon millier d'années.

Ce phénomène, permettant de rétablir l'équilibre entre l'atmosphère et l'océan, est actuellement en cours. Entre le début du XIXème siècle et la fin du XXème siècle, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère est passée de 280 à

380 ppm. Pour rétablir l'équilibre entre l'atmosphère et la couche de surface de l'océan, la quantité de CO_2 dissous augmente régulièrement dans la couche de surface (Maréchal et Mélières, 2010). L'océan joue donc un rôle de pompe à CO_2 en absorbant une partie du CO_2 anthropique.
De cette manière, l'océan a fixé environ le tiers du CO_2 émis depuis le début de l'ère industrielle et sans lui, la teneur en CO_2 de l'atmosphère aurait de 435 ppm et non pas d'environ 380 ppm en 2008 (Jacques et Saugier, 2008). Cette modification de l'équilibre, qui entraîne une augmentation de la concentration en CO_2 dans l'océan, a une conséquence principale qui peut venir contrarier ce mécanisme : **c'est l'acidification des océans.**

→ ACIDIFICATION DES OCÉANS

L'acidification des océans est l'expression utilisée pour décrire la diminution du pH de l'eau de mer provoquée par l'absorption du CO_2 atmosphérique d'origine humaine dans l'océan. Le pH diminue car l'augmentation de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'océan entraîne, suite aux réactions chimiques impliquées, une élévation de la concentration en ions hydrogène (H+) et de leur activité.

Or, plus l'océan s'acidifie, moins il peut absorber de CO_2. Le pH moyen des eaux de surface océaniques a déjà diminué de 0,1 unité depuis le début de l'ère industrielle (Maréchal et Mélières, 2010) et si ce rythme se maintient, le pH sera réduit de 0,3 en 2100 et il sera, d'ici quelques siècles, plus acide qu'il ne l'a jamais été depuis 300 Millions d'années *(Jacques et Saugier, 2008)*.

Cette acidification des océans a des conséquences majeures pour les écosystèmes marins. Même s'il est très difficile de faire des prévisions en termes d'évolutions des écosystèmes pélagiques, au moins deux hypothèses possibles, découlant d'expériences scientifiques, ont été énoncées :

- la première, formulée par le professeur Minday, est que l'acidification des océans pourrait perturber l'odorat des poissons et réduire leur instinct de survie.
- la seconde a été formulée par l'UMR Géoscience azur du CNRS basée à Villefranche-sur-mer. Les scientifiques de l'observatoire ont démontré que les mollusques ont du mal à fabriquer leur coquille dans une eau trop acide. Ils ont observé que l'acidification réduit de 50% la calcification des coraux et de 15 à 25% pour les moules et les huîtres.

QU'EST-CE QUE LE pH ?
C'est la mesure de l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) en solution, soit littéralement le potentiel Hydrogène. Une solution neutre a un pH de 7. Quand la concentration en ions H^+ augmente, le pH diminue. Il peut être inférieur à 7 et la solution est dite acide. Inversement, au-dessus de 7, la solution est classiquement dite basique ou alcaline (ancienne terminologie).

EN SAVOIR +

Lettre pigb-pmrc France n°21 - changement global - L'acidification des océans et ses conséquences
www.ocean-acidification.net/OAdocs/Martin_IGBPWCRParticle.pdf

LES CONSÉQUENCES DE L'AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE DES OCÉANS

Il est établi que les températures de surface moyennes de l'océan ont augmenté d'environ 0,5°C depuis 1970 (*Delmas et al., 2007)*. La première conséquence de cette augmentation de température concerne l'évolution du niveau de la mer. Une autre conséquence décelée est la diminution de l'absorption de CO_2, donc la réduction du rôle de puits à CO_2 de l'océan.

→ ELÉVATION DU NIVEAU DE LA MER

La *figure 16* montre que le niveau de la mer ne cesse d'augmenter depuis 1880. Les mesures sont plus précises depuis 1992 avec l'apparition des mesures par satellites.

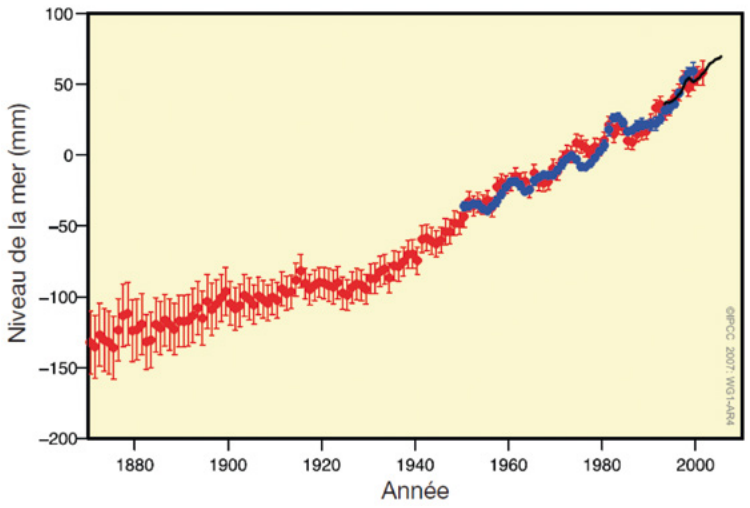
La première raison de l'élévation du niveau de la mer est l'augmentation de la température de surface qui entraîne une dilatation des eaux. "Une eau chaude est plus volumineuse qu'une eau froide".
La seconde raison est la fusion des glaciers continentaux et des calottes gla-

EN SAVOIR +

CNRS INFO N°40, Dilation thermique et montée des eaux, 2002
www.cnrs.fr/Cnrspresse/n400/pdf/n400rd06.pdf

ciaires. La fonte de ces glaciers continentaux et de ces calottes glaciaires provoque un ajout d'eau douce dans l'océan ce qui contribue à élever le niveau de la mer.
À titre d'exemple, si la calotte Antarctique fond, cela entraînerait une élévation du niveau de la mer de 60 à 70 mètres. Voir aussi la FICHE 9 › Changements climatique et cryosphère.

FIGURE 16 - Moyenne annuelle mondiale du niveau de la mer



En rouge, reconstruction des niveaux de zones de la mer, en bleu mesures marégraphiques et en noir altimétrie par satellite depuis 1992. Unités : mm par rapport à la moyenne 1961-1990.

D'après IPCC, 2007, WGI, fig 5.13

→ RÉDUCTION DE L'ABSORPTION DU CO_2 PAR L'OCÉAN

Plus la température des eaux augmente, plus la capacité d'absorption de l'océan en CO_2 se réduit et son rôle de pompe s'amenuise, car la quantité de CO_2 dissous est une fonction inverse de la température des eaux. Les eaux froides favorisent l'absorption du CO_2 par les océans.

→ MODIFICATION DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE

Il existe deux types de courants marins, les courants de surface qui sont dus principalement aux vents et une circulation profonde des eaux océaniques qui est dépendante de la salinité et de la température. La plongée des eaux de surface vers le fond des océans dépend de leur densité. Les eaux plus salées ainsi que les eaux froides sont plus denses, les eaux douces et/ou chaudes sont moins denses.

Le réchauffement de la température des eaux de surface et l'apport d'eau douce (fonte des glaciers continentaux...) peut modifier les courants en place notamment au Groenland.
Les courants marins transportant de la chaleur, la modification des circulations pourra avoir des conséquences sur le climat lui-même. Voir aussi la FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique.

D'importantes modifications, que ce soit dans l'océan ou dans ses relations avec les autres réservoirs (atmosphère principalement) sont attendues en réponse au changement climatique.

EN SAVOIR +

Le site de l'IFREMER
www.ifremer.fr

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Le phénomène permettant de rétablir l'équilibre gazeux entre l'atmosphère et l'océan est actuellement en cours.

- Les océans absorbent une partie du CO_2 de l'atmosphère, ce qui a pour conséquence principale leur acidification (diminution du pH des eaux) et consécutivement une modification de l'écosystème marin.

- L'augmentation de la température à la surface de la Terre s'accompagne d'une augmentation des températures de surfaces des océans entraînant à l'inverse une réduction de leur capacité d'absorption du CO_2, mais aussi la dilatation des eaux et une élévation du niveau de la mer.

- Combiné à l'apport d'eau douce par les fontes de glaces continentales, le réchauffement de la température des eaux de surface peut modifier à terme les courants marins, qui auront de lourdes conséquences sur le climat lui-même. Car l'océan joue un rôle fondamental dans la régulation du climat par son rôle dans le transfert de chaleur de l'équateur vers les pôles.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET CRYOSPHÈRE

Clarifier le rôle et l'importance relative des composantes de la cryosphère

Les glaces peuvent être à la fois des marqueurs des effets du changement climatique par leur bilan de masse et interférer par leurs spécificités dans la « machine climatique ». Leur analyse chimique fournit aussi nombre d'informations sur les conditions des changements climatiques passés. Les glaces, polaires en particulier, peuvent apparaître comme mémoires des changements climatiques, en subissant ces changements ou encore comme acteurs de modifications de notre environnement. Chaque composante de la cryosphère a ses propres spécificités et ses propres réactions face au changement climatique. Il faut donc bien séparer les différentes composantes lors de leur analyse car leurs importances et leurs conséquences ne sont pas les mêmes.

Cette fiche met en évidence, en particulier, ici, l'importance des glaces continentales sur l'élévation du niveau de la mer, mais aussi celui des glaces de mer sur les échanges de chaleur et les circulations océaniques et atmosphériques.

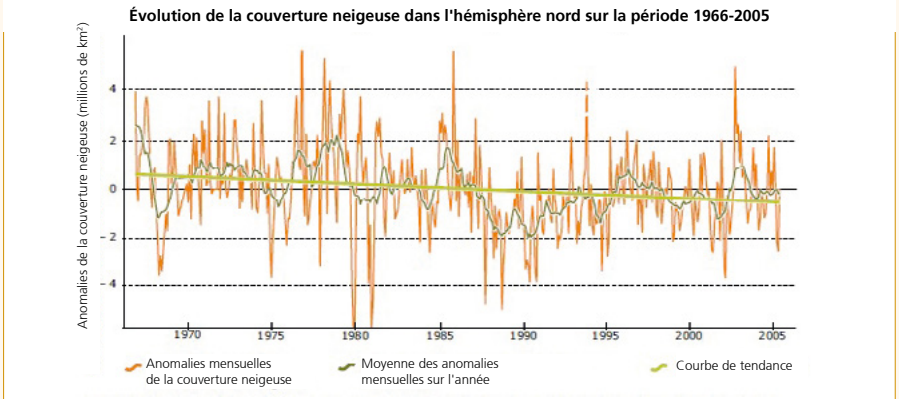
QU'EST-CE QUE LA CRYOSPHÈRE ?

C'est la composante du système climatique constituée de la totalité de la neige, de la glace et du gélisol au-dessus et au-dessous de la surface des terres émergées et des océans *(GIEC, 2007)*. Pour *Fellous et Gauthier (2007)*, la cryosphère comprend les différentes parties de la Terre dont la température est inférieure à 0°C, au moins une partie de l'année. La cryosphère comprend donc les glaciers continentaux (inlandsis), le permafrost, les glaces de mer…

IMPORTANCE DES GLACES CONTINENTALES (CALOTTES DE GLACE ET GLACIER DE MONTAGNE) SUR L'ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER

Les glaces continentales représentent le premier réservoir d'eau douce, l'Antarctique détient 90% des glaces terrestres (environ 30 milliards de km^3 de glace) *(Fellous et Gauthier, 2007)*. Que ce soit les glaciers de montagne ou les calottes de glace, ils se forment de la même manière, par accumulation de la neige, qui progressivement se transforme en glace. La variation annuelle de leur volume dépend de deux facteurs : l'apport de neige et la perte de glace.
Si la perte de glace est plus importante que l'apport de neige, cela entraîne une diminution du volume de glace et, si l'eau de fonte est transférée à l'océan, une élévation du niveau de la mer.

FIGURE 17 - Anomalies de couverture neigeuse correspondant à l'écart constaté chaque mois avec la moyenne glissante annuelle

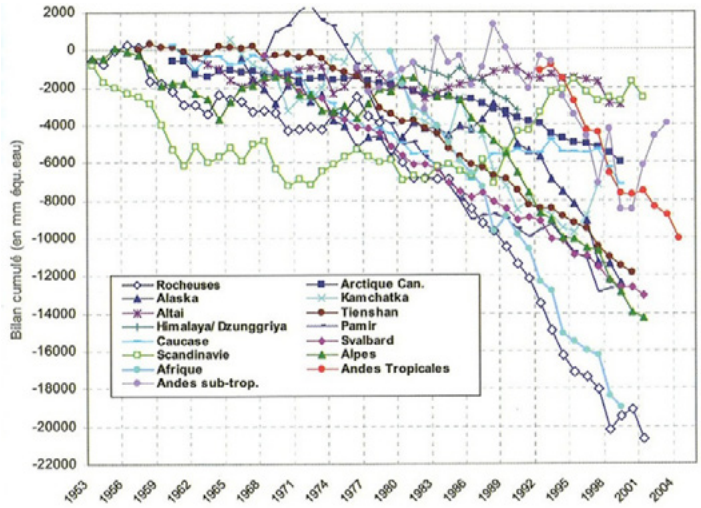


D'après l'Agence européenne pour l'environnement, 2006, à partir de données NOAA et PNUE.

Les calottes de glace se forment uniquement aux hautes latitudes. Il en existe deux actuellement, l'une sur le Groenland et l'autre sur le continent Antarctique. Ces deux calottes de glace **ont une importance capitale puisque leur disparition entraînerait une élévation du niveau de la mer** de 60 à 70 mètres (calotte Antarctique) et de 6 à 7 mètres (calotte du Groenland). Par conséquent, même une fonte partielle de ces calottes pourrait avoir de forts impacts sur le niveau de la mer.

Les glaciers de montagne sur le XXème siècle, à l'échelle de la planète, sont presque tous en constante diminution et l'évolution des bilans de masse cumulés est explicite ; elle indique une accélération de la régression des glaciers vers les années 1980 *(Maréchal et Mélières, 2010). (Figure 18)*

FIGURE 18 - Evolution depuis 1953 des bilans de masse cumulés moyens des principaux glaciers



D'après Francou et Vincent, 2007.

Le recul des glaciers ayant débuté bien avant ce siècle, (dans les Alpes il a débuté au cours du XIXème siècle, dans les Andes tropicales dès le XVIIIème siècle), il ne peut être attribué à l'activité humaine. La quantité de gaz à effet de serre (GES) émis par l'Homme au cours du XIXème siècle est trop faible pour en être le responsable à cette époque. Le recul des glaciers, au cours du XXème siècle, est naturel, il est une réponse à la fin du Petit Age Glaciaire. **En revanche, la forte accélération du recul des glaciers qui se dessine aux alentours des années 1980 peut apparaître comme la signature de l'impact du réchauffement climatique** *(Maréchal et Mélières, 2010)*.

ATTENTION À NE PAS CONFONDRE PERTE DE MASSE ET RECUL DES GLACIERS

L'avancement ou le recul d'un glacier est facile à percevoir grâce à des photos, des témoignages ou des preuves (moraines). Mais cette évolution dépend de nombreux paramètres des glaciers (forme du glacier, pente, exposition) qui ne sont pas reliés de façon directe à l'évolution du climat *(Maréchal et Mélières, 2010)*, tous ces paramètres étant différents d'un glacier à l'autre. La variation de longueur des glaciers ne peut donc pas être un indicateur scientifique du changement climatique puisqu'en plus des conditions climatiques de l'année, elle intègre le climat passé.

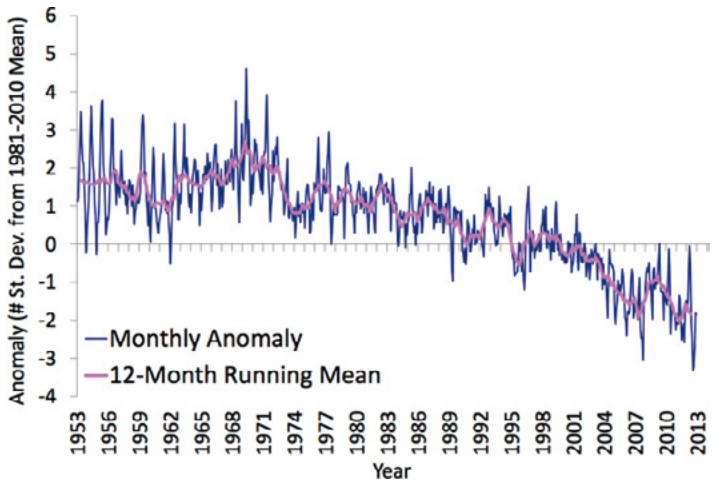
En revanche, le bilan de masse annuel d'un glacier est un paramètre significatif de l'évolution climatique. C'est la différence entre la quantité de glace accumulée par le glacier au cours de l'année et la quantité perdue *(Maréchal et Mélières, 2010)*. Il est donc lié directement aux conditions climatiques annuelles. Son calcul plus long qu'une simple observation peut être un inconvénient.

IMPORTANCE DES GLACES DE MER SUR LA CIRCULATION OCÉANIQUE ET LES ÉCHANGES DE CHALEUR AVEC L'ATMOSPHÈRE

Les glaces de mer proviennent de la congélation de l'eau de mer *(GIEC, 2007)*. Elles se forment lorsque l'eau de mer atteint une température comprise entre -1.7 et -1.9°C. Les glaces de mer **sont très présentes dans les océans Arctique et austral avec des surfaces variant fortement entre l'été et l'hiver.** Pour l'océan Arctique, la mer gèle sur une surface de 8 millions de km² en été jusqu'à 16 millions de km² en fin d'hiver *(Fellous et Gauthier, 2007)*. Pour l'océan Austral, cette différence entre été et hiver est encore plus forte, les variations vont d'environ 4 millions de km² en été à près de 20 millions de km² à la fin de l'hiver austral (*Fellous et Gauthier, 2007)*. De plus, l'évolution des glaces de mer dans l'hémisphère Sud et dans l'hémisphère Nord ne sont pas les mêmes. En effet, d'après Souchez *(2010)*, la superficie des glaces de mer a diminué dans l'hémisphère Nord (environ 1 million de km² sur 16 millions[3]), alors que la superficie des glaces de mer de l'Antarctique a augmenté ce qui s'explique par un effet du "trou" dans la couche d'ozone en Antarctique. Voir aussi la FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère.

[3] Pour repère, la superficie de la France est de 0,6 million de km²

FIGURE 19 - Anomalies de surface des glaces de mer de l'hémisphère Nord entre 1953 et 2013.



D'après Walt Meier and Julienne Stroeve, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder, 2013

QU'EST-CE QUE L'ALBÉDO?

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. "Les surfaces enneigées ont un albédo élevé […] et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible". *(GIEC, 2007)*

Chaque variation, même infime, de l'étendue des glaces de mer modifie le climat et l'environnement. En effet, les glaces de mer isolant l'océan des échanges de chaleur avec l'atmosphère *(Fellous et Gauthier (2007)*, toute modification de leur superficie engendre différentes rétroactions :

- modification de la température,
- modification de l'humidité,
- modification de la salinité.

A titre d'exemple, l'albédo, qui influence directement la température de l'atmosphère, en présence des glaces de mer est de 85% alors qu'en l'absence de ces mêmes glaces de mer, l'océan libre de glace ne possède plus qu'un albédo de 25%.

Dans le même esprit, la circulation océanique, dépendant principalement de la température et de la salinité des eaux, pourrait être modifiée, avec comme effet en chaîne une influence sur la circulation atmosphérique et le climat lui-même *(Fellous et Gauthier, 2007)*.

Voir aussi la FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique et la FICHE 8 › Changement climatique et océans.

A noter que la fonte des glaces de mer n'a aucun effet sur le niveau de la mer puisque la glace de mer est en équilibre hydrostatique *(Souchez, 2010)*.

La variation de l'étendue des glaces de mer non seulement modifie l'environnement physique (albédo, température, salinité…), mais bouleverse également l'environnement biologique car les glaces de mer représentent un habitat privilégié pour les écosystèmes locaux.

IMPACT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LE PERGÉLISOL

Le pergélisol est une zone gelée en permanence sur une certaine profondeur. Cette profondeur peut aller de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Le pergélisol recouvre 23 millions de km², ce qui fait environ un quart des terres de l'hémisphère nord *(Maréchal et Mélières, 2010)*.

Le réchauffement fait que l'épaisseur de la couche active, couche de surface située au-dessus du pergélisol qui gèle et dégèle chaque année, est plus importante et que l'épaisseur de la couche de sol gelé en permanence diminue *(Maréchal et Mélières, 2010)*.

Dans l'hémisphère nord, l'étendue maximum du pergélisol s'est réduite d'environ 7 % depuis 1900. La température de la couche supérieure du pergélisol a augmenté jusqu'à 3°C depuis les années 1980 *(GIEC, 2007)*.

Les changements de conditions de pergélisol peuvent affecter l'approvisionnement en eau, l'écoulement des fleuves, l'échange carbonique, la stabilité du paysage et peuvent endommager les infrastructures *(GIEC, 2007)*. Voir aussi la FICHE 7 › Effets combinés de l'action de l'Homme sur l'atmosphère.

QU'EST-CE QUE LE PERGELISOL OU PERMAFROST ?

C'est un sol ou une roche dont une partie ou la totalité de l'eau interstitielle est gelée en permanence *(GIEC, 2007)*.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les glaces continentales représentent le premier réservoir d'eau douce.
- Si la perte de glace est plus importante que l'apport de neige, cela entraine une diminution du volume de glace, et, si l'eau de fonte est transférée à l'océan, une élévation du niveau de la mer. Actuellement, on assiste à une accélération de la diminution du bilan de masse des glaciers liée au changement climatique.
- Les glaces de mer isolent l'océan des échanges de chaleur avec l'atmosphère. Toute modification de leur superficie engendre la modification de la température et de la salinité des eaux et le taux d'humidité dans l'atmosphère. Actuellement, on assiste à une diminution drastique de leur superficie en Arctique.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET BIODIVERSITÉ

Savoir aborder la question de l'adaptation des milieux naturels aux effets du changement climatique

QU'EST-CE QU'UN FACTEUR LIMITANT ?
C'est un caractère environnemental dont l'excès ou le défaut conditionne le développement des êtres vivants.

La biosphère est un système vivant complexe en équilibre permanent. Les espèces ne sont réparties ni uniformément ni de manière homogène à la surface de la Terre. Cette diversité biologique, formée par des millions d'organismes est loin d'être figée puisqu'elle a connu (et connaîtra) de nombreuses fluctuations, que ce soit dans un temps proche (biologique et écologique) ou dans un temps plus long (géologique et phylogénétique) *(Escarguel, 2009)*.

Les facteurs climatiques s'inscrivent dans les facteurs limitants avec lesquels l'environnement compose. La réflexion sur le changement climatique implique de faire la part entre l'ordinaire et ce qui est particulier au changement qui s'opère (vitesse du changement, origine…). L'affirmation de l'origine anthropique de ce changement induit aussi une responsabilité de la société sur ces changements et impose de faire la distinction entre les capacités naturelles des écosystèmes à évoluer avec le climat et le soutien dont doit faire preuve l'humanité vis-à-vis de ces mêmes écosystèmes.

Beaucoup de scientifiques envisagent aujourd'hui une nouvelle grande crise d'extinction, celle de l'Holocène (époque géologique dans laquelle nous vivons), dont le responsable serait l'espèce humaine par son action sur l'environnement et celle des énergies qu'il a su maîtriser. *(Grinevald, 2011)*.

Cette fiche revient sur la singularité et la rapidité de ce changement climatique et la modification des paramètres écologiques affectant la vie des espèces, leur répartition et leur nombre.

LES PARTICULARITÉS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LEURS INFLUENCES SUR LES STRATÉGIES D'ADAPTATION DU VIVANT

Les précédents passages d'une période glaciaire à interglaciaire ou inversement engendraient un changement de température d'environ 5°C, une fois moyennée sur la surface de la planète *(Maréchal et Mélières, 2010)*. Selon le GIEC, la température moyenne à la surface de la Terre devrait augmenter de 1,4 à 5,8°C d'ici la fin du XXIe siècle, avec un réchauffement plus important pour les zones terrestres et les latitudes élevées que pour les océans et les régions tropicales. Même si l'augmentation (prévue) des températures est du même ordre que celle des changements passés, trois spécificités rendent particulier ce changement climatique.

La première est que les précédentes oscillations de température entre période glaciaire et période chaude (ou interglaciaire) étaient naturelles, elles étaient dues à une modification des fluctuations du soleil et aux rétroactions qui suivaient, alors que **ce changement climatique est incontestablement dû aux activités humaines** *(Académie des Sciences, 2010)*. Voir aussi FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique.

La seconde spécificité est la rapidité de l'augmentation des températures. En effet, les transitions glaciaires interglaciaires ont mis plusieurs millénaires pour se mettre en place à l'échelle mondiale alors que le changement climatique actuel se

ferait en seulement quelques siècles. Les écosystèmes n'auront donc pas le même laps de temps pour s'adapter. Les adaptations (évolution génétique, sélection naturelle) ou les migrations ayant permis aux espèces de s'adapter lors des transitions glaciaires-interglaciaires auront moins de temps pour se développer.

La troisième particularité de ce changement climatique, est que **la Terre, actuellement dans une période interglaciaire chaude, passerait dans une période encore plus chaude.** C'est donc un contexte environnemental nouveau que nous devrions connaître dans une centaine d'années.

LES PRINCIPALES MODIFICATIONS DES FACTEURS LIMITANTS CLIMATIQUES

Les modifications du changement climatique sont visibles à travers deux classes de modifications principales pour *Maréchal et Mélières (2010)*. L'une est l'avancée de la saison chaude, qui entraîne une avancée du cycle de la vie, introduisant un décalage temporel entre de nombreux cycles, […] (désynchronisation déjà observée entre les dates de reproduction et les dates de disponibilité du stock alimentaire) et l'autre « l'élévation de la température moyenne, qui entraîne d'une part des déplacements […] et d'autre part des adaptations (développement de la taille, évolution de la fréquence de reproduction…).

RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX FACTEURS LIMITANTS CONDITIONNANT LE DÉVELOPPEMENT DES ESPÈCES

Dans un temps proche, les changements de la biodiversité sont régis par les facteurs biologiques et écologiques. Les principaux facteurs limitants peuvent être catégorisés selon qu'ils sont climatiques, édaphiques (caractéristiques liées au sol), ou biotiques.

- Les **facteurs climatiques** sont principalement la température, la lumière, les précipitations ou le vent.
- Les **facteurs édaphiques** sont ceux en rapport avec le sol. Cela peut-être la texture du sol, sa structure ou encore l'hygrométrie, mais les facteurs limitants édaphiques peuvent également être chimiques. La biodiversité sera différente selon le pH des sols, ou bien selon les différents éléments minéraux présents.
- Enfin, les **facteurs biotiques** caractérisent l'ensemble des influences qu'exercent les êtres vivants entre eux et sur leur milieu. Ce sont des facteurs comme la prédation (et le parasitisme), la compétition, qu'elle soit entre les différentes espèces (compétition interspécifique) ou entre les différents individus de la même espèce (compétition intraspécifique).

Il est important également d'étudier **la combinaison de ces différents facteurs.** En effet, étudiés un à un, ils peuvent ne pas être limitants alors que leur combinaison peut l'être.

Enfin, **les facteurs écologiques d'adaptation telle que la sélection naturelle** doivent être pris en compte. La sélection naturelle est un tri des individus les plus aptes à survivre ou à se reproduire, quelle que soit la raison pour laquelle ils possèdent une telle aptitude.

EN SAVOIR +

Le site du CNRS - EVOLUTION De l'origine de la vie aux origines de l'homme
www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/
www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosevol/decouv/normal/normal.html

QU'EST-CE QUE LA FORME PHYSIQUE ?

C'est "une mesure de l'aptitude d'un individu à produire une progéniture viable et à contribuer aux futures générations" *(Mackenzie et al., 2000)*.

RAPPEL SUR LES PRINCIPAUX FACTEURS LIMITANTS CONDITIONNANT LE DÉVELOPPEMENT DES ESPÈCES (SUITE)

Les gènes que possèdent les individus les plus aptes à la survie deviendront fréquents, tandis que les gènes avec la plus mauvaise chance de survie pour les individus deviendront rares. La sélection naturelle qui agit sur les différences héréditaires dans la forme physique aboutit à une adaptation ; étant entendu que d'un point de vue de l'écologie, l'adaptation est : tout trait héréditaire (caractère capable d'être transmis aux générations suivantes), qu'il soit comportemental, morphologique ou physiologique, qui peut aider à la survie ou à la reproduction dans un environnement particulier *(Mackenzie et al., 2000)*. Cette adaptation permet aux espèces d'évoluer pour survivre à un changement de leur environnement. Malgré cela, des changements importants (lents ou rapides) ont entraîné des extinctions massives d'espèces.

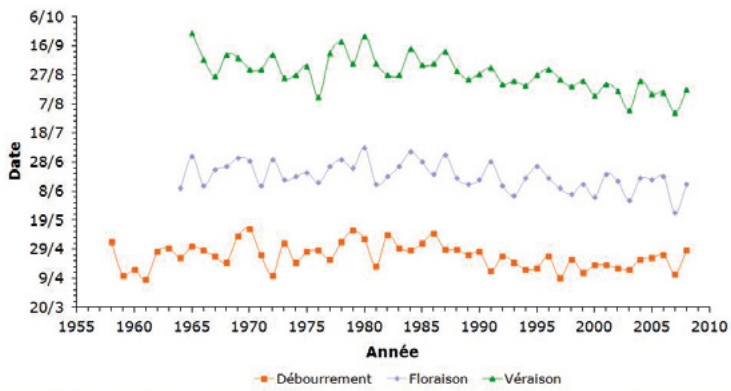
→ L'ALLONGEMENT DE LA SAISON CHAUDE

Le début de la saison chaude est avancé et la fin retardée ; on assiste donc à son allongement.

Les conséquences de l'avancée de la saison chaude sont déjà visibles à travers des observations, principalement dans le domaine agricole, documentant essentiellement **l'évolution des dates de floraison et de fructification** *(Maréchal et Mélières, 2010)*. La *figure 20* est un exemple de ces observations sur les différents stades de développement (débourrement, floraison, véraison) du Riesling.
D'autre part, en ce qui concerne les animaux, l'allongement de la saison chaude se répercute sur les **dates de migration**, avec des arrivées plus précoces et des départs plus tardifs (observations concernant les USA, l'Europe, l'Afrique et l'Australie).

Enfin, l'avancée de la saison chaude peut engendrer une **"désynchronisation" de l'offre et de la demande en nourriture lors de la période de reproduction** *(Maréchal et Mélières, 2010)* ce qui peut avoir des conséquences importantes. Si la nourriture n'est plus disponible au moment de la reproduction, cela peut fragiliser les écosystèmes.

FIGURE 20 - Stade de développement du riesling en Alsace



D'après Duchêne et Schneider, 2005

→ L'ÉLÉVATION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE

L'élévation de la température moyenne intervient fortement sur le déplacement des espèces qui ont comme technique d'adaptation, la migration, afin de retrouver les températures dont elles ont besoin pour s'épanouir. Les espèces qui auront besoin de migrer pour s'adapter auront plus de difficulté à migrer lors de ce changement climatique que lors des précédents puisque, en plus des contraintes spatiales (barrières naturelles[4]) qui étaient déjà présentes lors des précédents changements climatiques, deux contraintes s'ajoutent :

- La colonisation des sols par l'Homme. En effet, une partie importante des terres étant déjà utilisée par l'Homme, notamment pour l'agriculture ou l'urbanisation, cela réduit les possibilités de migration des espèces *(Maréchal et Mélières, 2010)*.
- La vitesse du changement environnemental. La rapidité avec laquelle le climat évoluera (quelques siècles contre plusieurs millénaires), fait que seules les espèces les plus opportunistes, à forte capacité de dissémination et à croissance rapide, pourraient s'adapter *(Arnould et Simon, 2007)*.

Pour autant, il est difficile d'anticiper l'adaptation locale des écosystèmes à un changement global. Des facteurs locaux peuvent intervenir, par exemple un sol suffisamment épais, peut compenser le climat peu favorable à une espèce et ainsi lui permettre de s'adapter *(Arnould et Simon, 2007)*. De plus, comme le disent Arnould et Simon, le facteur le plus important pour les végétaux semble bien davantage le bilan hydrique des sols, en période de végétation notamment, que les moyennes thermiques. Il est difficile d'établir les transformations que subira un écosystème uniquement à partir de la température moyenne, de nombreux facteurs rentrant en jeu. On sait par exemple que des effets de seuils interviendront sur les réponses adaptatives des espèces pour des températures extrêmes.

QU'EST-CE QUE LA RÉSILIENCE ?

"Capacité d'un système social ou écologique à absorber des perturbations tout en conservant sa structure de base et ses modes de fonctionnement, la capacité de s'organiser et la capacité de s'adapter au stress et aux changements" *(4ème rapport du GIEC, 2007)*.

PRISE DE RECUL SUR LES DYNAMIQUES D'ÉVOLUTION DU VIVANT ET SUR LA RESPONSABILITÉ DES POLITIQUES DE GESTION DES ÉCOSYSTÈMES

→ LA RÉSILIENCE DU VIVANT DANS LE TEMPS : PEUT-ON PARLER D'UNE NOUVELLE ÈRE "L'ANTHROPOCÈNE" ?

La biodiversité a une histoire, longue de plus de 3,5 milliards d'années, mouvementée, faite d'extinctions et de diversifications, de crises et de reconquêtes, sur fond de catastrophes naturelles et de changements globaux *(Escarguel, 2009)*.

Il a été démontré qu'elles ont été systématiquement suivies d'une phase d'expansion, c'est-à-dire de développement accru de la biodiversité. En effet, la dynamique de l'évolution a toujours permis de compenser ces extinctions massives et d'accroître, après plusieurs dizaines de millions d'années, le nombre total de familles que compte la Terre. En réponse à cette perte de biodiversité, une régression du vivant a lieu mais cette régression ne dure que 10 à 15 millions d'années, cette période correspondant au temps dont la planète a besoin pour se réorganiser.

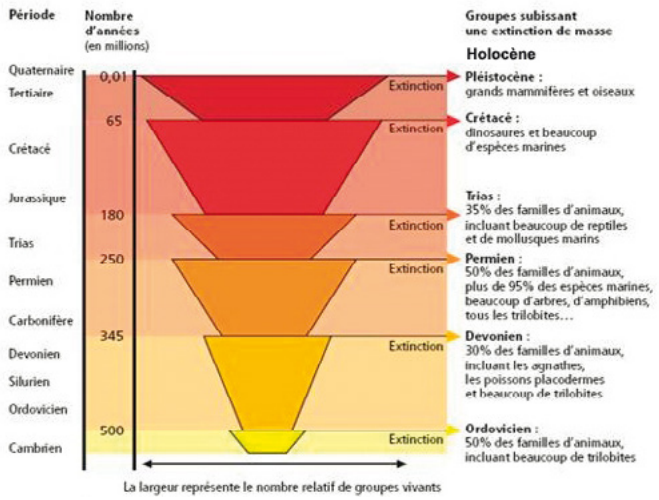
La *figure 21* montre l'augmentation du nombre relatif d'êtres vivants après une extinction. Cette figure est importante non pas pour le nombre d'extinctions qu'elle définit mais pour les périodes d'expansion qui les suivent.

EN SAVOIR +

Le site du CNRS
Extinction des espèces et crises d'extinction
www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/index.php?pid=decouv_chapA_p2_f1&zoom_id=zoom_a2_1

[4] Les barrières naturelles comme les mers (la mer Méditerranée), les chaînes de montagne (Alpes, Pyrénées) peuvent ralentir ou empêcher la migration des espèces animales et végétales *(Arnould et Simon, 2007)*.

FIGURE 21 - Les grandes crises d'extinction de la biodiversité



D'après Barbault, 2000 p. 43, tiré de CNRS

Les actions de l'Homme ont modifié l'équilibre de la Terre et entraîné un changement climatique différent des changements climatiques passés. Certains scientifiques parlent d'une nouvelle époque, l'Anthropocène, qui succéderait à l'époque définie actuellement, depuis environ 12 000 ans, l'Holocène.

Le terme Anthropocène est "un néologisme scientifique relativement récent" *(Grinevald, 2008)* qui traduit l'influence de l'Homme sur le fonctionnement des écosystèmes de la planète. D'après quelques scientifiques dont Paul Crutzen, prix Nobel de chimie en 1995, cette entrée dans une nouvelle ère s'est faite très récemment, à la fin du XVIIIème siècle. Pour être plus précis, les débuts de cette nouvelle ère "remonteraient symboliquement à la création par James Watt de la machine à vapeur en 1784" *(Cometti G., 2009)* alors que pour Jacques Grinevald, le début de l'Anthropocène est lié au cycle du carbone. En effet, la variation de CO_2 oscillait entre 180 ppm en période glaciaire et 280 ppm en période interglaciaire alors qu'actuellement la concentration est de plus de 380 ppm. C'est la discontinuité, le début de l'accélération des changements, la rupture d'avec la stabilité de l'Holocène qui marquerait le début de l'Anthropocène.

Guy Jaques *(2011)* estime, quant à lui, que l'entrée dans l'Anthropocène a deux causes : l'une technologique, l'autre démographique. Ce sont donc les évolutions, tant démographique que technologique, qui ont entraîné l'entrée dans cette nouvelle ère géologique, d'après ces scientifiques.

La création de cette nouvelle ère a pour objectif de reconnaître que l'espèce humaine, par son action et ses répercussions en cascades, est devenue la principale force géologique et qu'elle modifie le climat, la biosphère l'hydrosphère, la lithosphère *(Grandjean, 2011)* mais également les cycles biogéochimiques (cycle du carbone, de l'azote…). Pour cela, un groupe de travail, qui dépend de la commission internationale de stratigraphie, crée un dossier pour faire entrer l'Anthropocène comme nouvelle époque officielle lors des prochains Congrès géologiques internationaux.

La reconnaissance de la responsabilité de l'Homme oblige à considérer

son action pour soutenir l'adaptation du vivant aux nouvelles conditions. Selon le schéma observé, il serait facile de conclure à un élargissement des groupes vivants au changement climatique malgré la disparition importante d'espèces. Cette résilience dont fait preuve le vivant se joue à l'échelle des temps géologiques. Elle n'est sans doute pas à mettre en relation avec la capacité d'adaptation d'un certain nombre d'espèces, les "invasives" par exemple, qui progressent aux dépens d'autres espèces locales, subissant plus les effets des avancées de la saison chaude ou de l'élévation de température. Il s'agit là d'une adaptation spontanée à plus court terme sur laquelle notre société doit se poser la question des effets sur le fonctionnement et la richesse des écosystèmes.

→ L'ADAPTATION DES POLITIQUES DE GESTION DE LA BIODIVERSITÉ FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'histoire montre que la mise en place de stratégies de préservation de la biodiversité repose sur la manière d'associer protection et développement. C'est pourquoi on parle plutôt de gestion des milieux.

La première politique mise en place pour protéger la biodiversité fut de créer des réserves strictes (wilderness areas) *(Arnould et Simon, 2007)*. C'était la vision américaine. Ces réserves étaient des espaces sauvages soustraits à l'intervention des sociétés qui étaient en opposition avec l'espace habité transformé par l'Homme *(Arnould et Simon, 2007)*. Cette notion de réserves strictes sera intégrée dans une seconde vision de la protection de la nature, qui va se développer : les parcs nationaux. Le premier parc national créé est celui de Yellowstone aux Etats-Unis en 1872. Cependant, ce n'est qu'à partir de la conférence de Londres en 1933 que la notion des parcs nationaux est clairement établie et elle repose sur trois principes *(Arnould et Simon, 2007)* :

- la responsabilité étatique,
- l'exclusion des activités jugées incompatibles avec la protection (chasse, cueillette, abattage d'arbres),
- l'ouverture au public à des fins d'observation.

A travers ces parcs, apparaît une ambiguïté entre conservation de cette nature exceptionnelle, souci d'ouverture au public et intérêts économiques *(Arnould et Simon, 2007)*. En effet, l'une des conditions du classement du parc Yellowstone était « l'absence de valeur économique » *(Arnould et Simon, 2007)*, telle était la vision des relations Homme/ Nature à cette période. Mais l'inadéquation entre protection totale et conservation de la biodiversité *(Arnould et Simon, 2007)* s'est révélée par la dégradation de la biodiversité. La fermeture de ces aires à toute activité anthropique a modifié l'équilibre de l'écosystème et entraîné la dégradation de la biodiversité qu'il voulait protéger. Cette expropriation des populations a provoqué une concentration sur les environnements voisins non protégés accompagnée d'une perte de biodiversité sur ces mêmes territoires voisins.

Dans la deuxième moitié du XXème siècle, l'internationalisation des questions environnementales remet en cause cette vision et de nouvelles questions sur la manière d'aborder la protection de la nature sont développées. Le résultat est le passage de stratégies de protection à des stratégies de gestion des espaces naturels remarquables, ce qui implique d'intégrer de nouveaux aspects dans la protection tels que la considération des sociétés comme facteurs de conservation ou le maintien de l'activité humaine pour favoriser l'hétérogénéité du milieu *(Arnould et Simon, 2007)*.

Ce changement de stratégie est possible grâce aux nouvelles recherches scientifiques et aux nombreux textes internationaux de protection de la nature (convention de RAMSAR sur les zones humides (1971), convention CITES sur le commerce des espèces de faune et flore sauvage (1975), convention de Bonn relative à la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage (1979)…)

signées par les pays.
Le programme *Man and biosphère* (MAB), défini par l'UNESCO en 1970, met l'accent sur "la nécessité d'associer conservation, développement et mise en réseau des espaces protégés" *(Arnould et Simon, 2007)*.

C'est bien cette mise en réseau qui est aujourd'hui au cœur des réflexions sur la préservation de la biodiversité. Le congrès de l'UICN de 2003 à Durban a envisagé un dispositif capable de répondre à ces dynamiques : la notion de "corridor écologique". "L'objectif est ici de maintenir, voire d'établir, des espaces de connexion entre les différents habitats de manière à permettre la mobilité des espèces" *(Arnould et Simon, 2007)*.

Le changement climatique en cours engendrera des déplacements d'espèces. La connexion entre les différents habitats est donc encore plus importante et il s'agit de prévoir ces connexions, permettant aux espèces de se déplacer, dans les politiques d'aménagement du territoire.

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Outre son origine et la rapidité de l'augmentation des températures, la caractéristique la plus importante du changement climatique en cours est que la Terre, qui est actuellement dans une période interglaciaire chaude, passerait d'ici la fin du siècle dans une période encore plus chaude.

- Ces particularités influencent directement les stratégies d'adaptation du monde vivant et doivent nous obliger à considérer notre action pour soutenir l'adaptation du vivant aux nouvelles conditions. La reconnexion des milieux naturels entre eux est l'action la plus évidente.

- En effet, les principales modifications constatées des facteurs limitants climatiques sont :
  - L'avancée de la saison chaude qui entraîne une avancée du cycle de la vie, introduisant un décalage temporel entre de nombreux cycles (par exemple entre celui de la reproduction et celui de la disponibilité du stock alimentaire).
  - L'élévation de la température moyenne qui entraîne d'une part des déplacements et d'autre part des adaptations des espèces (développement de la taille, évolution de la fréquence de reproduction…).

EVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES EXTRÊMES ET LEURS CONSÉQUENCES

Comprendre les difficultés d'appréciation de l'influence du changement climatique sur l'évolution des évènements météorologiques et climatiques extrêmes

L'évolution du climat modifie la fréquence, l'intensité, l'étendue, la durée et le moment d'apparition des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. Ces phénomènes extrêmes engendrent alors des catastrophes dans les sociétés humaines, au caractère sous entendu inéluctable. Les conséquences pourraient toutefois être évitées par des mesures en amont de respect du fonctionnement des écosystèmes et une organisation des sociétés humaines plus efficiente.

Par souci de transparence mais aussi de prévention, il est important de connaître les avancées de la recherche sur ce champ et de faire la part des choses.

Cette fiche apporte un éclairage sur ce que la recherche qualifie d'événements météorologiques et climatiques extrêmes, sur leurs liens avec le changement climatique et sur l'intervention possible pour limiter leurs répercussions.

CARACTÉRISATION DES ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES ET CLIMATIQUES EXTRÊMES ET DE L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LEUR ÉVOLUTION

Il existe une multitude d'événements météorologiques et climatiques extrêmes, selon leurs caractéristiques propres mais aussi les échelles temporelle et spatiale auxquelles ils se produisent. En effet, certains évènements se produisent sur un court laps de temps (cyclones, orages…) et d'autres se déroulent sur de longs pas de temps (sécheresse, grands froids…). "Les évènements climatiques se différencient également par leur échelle spatiale, du phénomène local comme la tornade jusqu'au phénomène étendu comme la sécheresse" *(Goubanova, 2007)*.

La connaissance des caractéristiques des évènements climatiques extrêmes et leur distinction en deux catégories facilitent l'observation de leur évolution. On distingue :

- **les évènements simples** qui ne sont caractérisés que par une seule variable (la température par exemple). Leur connaissance repose sur l'observation de l'évolution des valeurs extrêmes des paramètres climatiques (température, précipitation),
- **et les phénomènes complexes** qui sont associés à plusieurs variables (sécheresse, crues,…) et qui peuvent résulter "d'une dissipation, subite et chaotique, d'énergie accumulée" *(Bourrelier et Dunglas, 2009)* comme les cyclones ou les tempêtes. Un cyclone, par exemple, se caractérise ainsi à la fois par des précipitations intenses mais également par des vents forts *(Goubanova, 2007)*.

Tous les évènements extrêmes ne sont pas abordés dans la suite de ce document, mais seulement les principaux, qui sont aussi, souvent, les mieux documentés. L'impact du changement climatique sur ces événements est souligné.

QU'EST-CE QU'UN ÉVÉNEMENT EXTRÊME ?

C'est un événement qui est rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique. Les définitions de "rare" varient, mais un événement météorologique extrême serait normalement aussi rare ou plus rare que le 10ème ou 90ème percentile *(GIEC, 2007)*, cela signifie que l'événement est situé dans les 10 % les plus rares. Il faut donc confronter l'intensité et la fréquence d'un événement avec les événements passés pour définir s'il est extrême ou non. Concernant les phénomènes extrêmes à la fois météorologiques et climatiques, on parlera aussi d'extrêmes climatiques.

→ LES ÉVÉNEMENTS EN RELATION AVEC LA TEMPÉRATURE

Les températures ont une importante variabilité tant spatiale que temporelle. Voir aussi la FICHE 2 › Le réchauffement global actuel. Pour autant, ces variations de température, même faibles, peuvent engendrer des évènements extrêmes de grande ampleur (canicule, sécheresse, grand froid…) qui auront des conséquences sur beaucoup d'autres domaines (économique, politique, sociale…).

L'évolution de la température moyenne annuelle au niveau du globe, qui caractérise le changement climatique en cours, marque un réchauffement (Voir aussi la FICHE 2 › Le réchauffement global actuel) **et les modèles prévoient une élévation prononcée des températures extrêmes d'ici à la fin du XXIe siècle.** Il est pratiquement certain que l'on observera à l'échelle du globe une augmentation en fréquence et en amplitude des valeurs extrêmes des températures maximales quotidiennes au cours du XXIe siècle. Il est très probable que la durée, la fréquence et/ou l'intensité des périodes chaudes ou des vagues de chaleur s'accroîtront sur la majeure partie des terres émergées *(GIEC, 2012)*. Alors, la canicule de 2003 à Paris, qui a été classée comme événement extrême, deviendrait courante en 2100 *(Bourrelier et Dunglas, 2009)*.

→ LES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES EN RELATION AVEC LES PRÉCIPITATIONS

Les précipitations, terme qui recouvre les chutes de neige et les pluies, constituent également un facteur extrêmement variable à la surface du globe que ce soit dans l'espace ou dans le temps.

D'après Maréchal et Mélières *(2010)*, l'évolution de la moyenne au cours du siècle dernier ne montre pas de tendance identifiable et estimer l'évolution des précipitations est encore plus complexe que d'estimer l'évolution de la température. Il est donc préférable de ne pas conclure trop hâtivement de la relation directe entre changement climatique et précipitations. Cependant, plus il fait chaud, plus l'évaporation est forte et plus la quantité de vapeur d'eau injectée dans l'atmosphère est importante. Il est alors possible qu'une température plus élevée accélère le cycle de l'eau : plus d'eau évaporée, plus de vapeur d'eau dans l'atmosphère, plus de pluie.

Ainsi, il est probable que la fréquence de fortes précipitations ou la part de ces dernières dans la pluviosité totale augmentera au XXIe siècle dans de nombreuses régions du globe. Cela vaut surtout pour les hautes latitudes et les zones tropicales et, en hiver, pour les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord *(GIEC, 2012)*.

On estime avec un degré de confiance moyen que la sécheresse s'intensifiera pendant le XXIe siècle au cours de certaines saisons et dans plusieurs régions, en raison de la baisse de la pluviosité et/ou de la hausse de l'évapotranspiration. Cela inclut le Sud de l'Europe et la région méditerranéenne, l'Europe centrale, le centre de l'Amérique du Nord, l'Amérique centrale et le Mexique, le Nord-Est du Brésil et l'Afrique australe. Pour les autres régions, on n'accorde qu'un faible degré de confiance aux résultats, faute de concordance dans les projections touchant à l'évolution du phénomène (selon le modèle et l'indice de sécheresse utilisé). La divergence des définitions, l'insuffisance des observations et l'impossibilité d'inclure dans les modèles tous les facteurs en jeu expliquent que les projections de la sécheresse bénéficient seulement d'un degré de confiance moyen *(GIEC, 2012)*.

L'évolution attendue des précipitations et des températures pourrait modifier les paramètres des crues même si, globalement, on attribue un faible degré de confiance aux projections

de changements dans les crues fluviales. Le degré de confiance est faible parce que le degré d'évidence est lui-même faible et parce que les causes des variations régionales sont complexes, bien qu'il existe des exceptions. On estime avec un degré de confiance moyen (sur la base de raisonnements physiques) que l'augmentation des fortes précipitations contribuera à accroître les inondations locales dans certains bassins ou régions *(GIEC, 2012)*.

→ LES TEMPÊTES

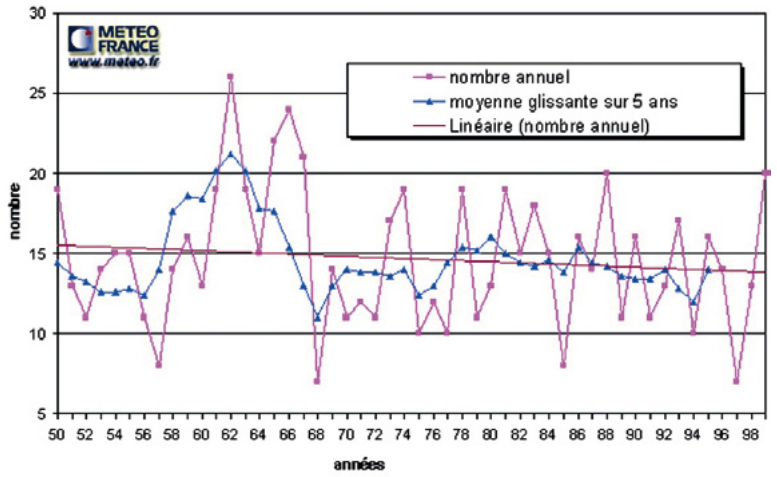
Plusieurs types d'événements météorologiques sont définis par le terme tempête. On considère couramment qu'une perturbation est devenue une tempête lorsque les vents qu'elle provoque dépassent une vitesse d'environ 90 km/h, mais d'autres paramètres peuvent être en compte. On parle aussi :

- de tempêtes tropicales, sous ces latitudes, pour des vitesses de vent comprises entre 65 et 119 km/h, et de cyclones tropicaux au-delà de 119 km/h (cf. paragraphe précédent),
- de tempêtes extratropicales, dans les zones tempérées, phénomène d'une complexité extrême et difficile à caractériser.

Cette difficulté à caractériser les tempêtes pour la zone tempérée est un frein à la détermination de leur déclenchement, de leur évolution et de la connaissance de l'effet du changement climatique global sur ces évènements. D'après les dernières recherches, le déclenchement d'une tempête [en zone tempérée] est lié à un ensemble d'interactions dans toute l'épaisseur de la troposphère et suivant des trajectoires liées au courant-jet d'altitude *(Delmas et al., 2007)*.

La *figure 22* montre que le nombre de tempêtes observées en France chaque année entre 1950 et 1999 est extrêmement variable et la tendance sur cette période (nombre annuel) est à la baisse.

FIGURE 22 - Nombre de tempêtes observées chaque année de 1950 à 1999 sur la France



D'après Météo France

Les cyclones tropicaux appelés "ouragans" dans l'Atlantique tropical et "typhons" dans le Pacifique Nord-Ouest se forment dans la zone de convergence intertropicale et uniquement sur l'océan, au-dessus d'eaux très chaudes dont la température de surface est supérieure à 27-28°C .

La reconstruction de longues séries d'observations de l'activité cyclonique, indispensable pour caractériser un changement possible dans la distribution des cyclones, est très difficile. Cependant, un article paru dans la revue scientifique Nature en septembre 2005 montre qu'il n'y a pas eu d'augmentation du nombre total de cyclones sur les 56 dernières années, mais que l'intensité et la durée des cyclones a crû de 50 % *(Delmas et al., 2007)*. L'une des raisons identifiées est l'augmentation de la température de l'océan.

En effet, la température de l'océan influence l'intensité des cyclones : plus l'eau est chaude, plus l'évaporation est intense, et plus les nuages convectifs peuvent se développer. Comme il est démontré que les températures moyennes de surface de l'océan ont augmenté d'environ 0.5°C depuis 1970, **il est incontestable que le réchauffement global contribue à l'aggravation des risques cycloniques, peut-être pas par l'augmentation de leur fréquence, mais par l'aggravation de leur intensité** *(Delmas et al., 2007)*.

D'autres facteurs, El Niño (Voir aussi la FICHE 1 › Les facteurs de la variabilité climatique) notamment, peuvent influencer la fréquence et l'intensité de l'activité cyclonique. Ainsi, il est probable que la vitesse moyenne du vent maximal associée aux cyclones tropicaux augmentera, mais peut-être pas dans tous les bassins océaniques. Il est probable que la fréquence globale des cyclones tropicaux diminuera ou restera presque la même *(GIEC, 2012)*.

On estime que le nombre de cyclones extratropicaux diminuera en moyenne dans les deux hémisphères et qu'on assistera au déplacement vers les pôles des trajectoires suivies par les tempêtes extratropicales.

LES LIMITES D'APPRÉCIATION DE L'AMPLEUR DE L'ÉVÉNEMENT ET DE SON INCIDENCE LOCALE

→ DIFFICULTÉS D'OBSERVATION ET DE MODÉLISATION SCIENTIFIQUE DU PHÉNOMÈNE

Il est encore aujourd'hui difficile de caractériser précisément l'influence du changement climatique sur l'évolution des événements extrêmes. Car plus un événement est rare, plus la série d'observations qui permettra de le caractériser devra être longue. La modification des extrêmes peut être liée à un changement de la moyenne, la variance ou la forme de la distribution de probabilité, ou encore de ces trois paramètres à la fois. Pour une bonne caractérisation statistique d'un évènement qui se reproduit tous les cinq ans, il est nécessaire d'avoir une série d'observations d'environ cent ans. Sans de longues séries d'observations, il s'avère impossible d'établir de façon fiable de tels évènements extrêmes à partir des observations météorologiques passées *(Fellous et Gauthier, 2007)*. Ainsi, un grand nombre de phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes restent le fait de la variabilité naturelle du climat, qui continuera à influencer les extrêmes futurs, outre l'effet du changement climatique d'origine anthropique. *(GIEC, 2012)*.

D'autre part, il n'est pas encore possible de modéliser tous les processus physiques entrant en jeu dans les dynamiques climatiques et des incertitudes liées aux modèles demeurent.

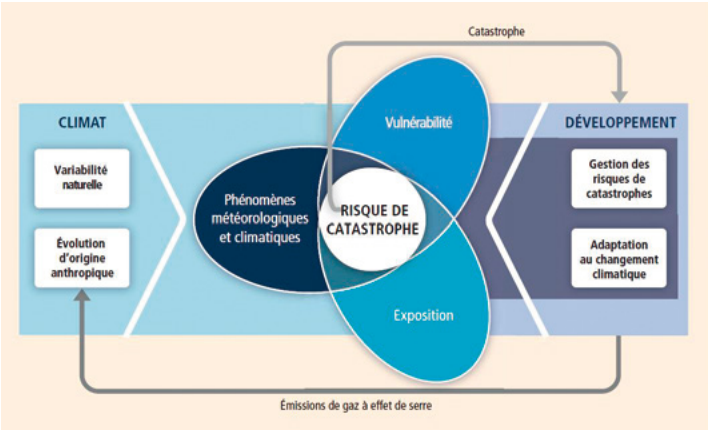
QU'EST-CE QUE LA VARIANCE ?

C'est la mesure statistique de la variabilité (ou étendue) des différentes valeurs que peut prendre une variable.

→ INTERACTION AVEC LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT LOCAL PAR L'HOMME

Un phénomène météorologique ou climatique extrême peut avoir de lourdes répercussions sur les systèmes humains, écologiques ou physiques. Mais selon les caractéristiques physiques et humaines du territoire et la manière dont l'événement sera géré, les conséquences peuvent être plus ou moins catastrophiques. Par exemple, un cyclone tropical a des conséquences très différentes selon l'endroit et le moment où il atteint les côtes. De même, une vague de chaleur a une incidence très variable sur les populations selon leur degré de vulnérabilité *(GIEC, 2012)*. Notre perception et notre mémoire sont marquées par ces épisodes remarquables, ponctuels et locaux . De plus, nous ne sommes pas sensibles à un réchauffement lent et progressif, en partie masqué localement par une forte variabilité *(Masson-Delmotte, 2011)*, aussi bien journalière (variation jour/nuit), que saisonnière (hiver/été) et annuelle. **Il ne faut donc pas confondre l'évolution des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes avec celle des risques de survenance de catastrophes naturelles.**

FIGURE 23 - Détermination schématique des notions essentielles intervenant dans les relations d'influence entre phénomènes météorologiques et climatiques, et, probabilité d'une catastrophe



D'après Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique à l'intention des décideurs, GIEC, 2012.

QU'EST-CE QU'UNE CATASTROPHE ?

C'est une grave perturbation du fonctionnement normal d'une population ou d'une société due à l'interaction de phénomènes physiques dangereux avec des conditions de vulnérabilité sociale, qui provoque sur le plan humain, matériel, économique ou environnemental de vastes effets indésirables nécessitant la prise immédiate de mesures pour répondre aux besoins humains essentiels et exigeant parfois une assistance extérieure pour le relèvement *(GIEC, 2012)*.

L'état de catastrophe naturelle est d'ailleurs déterminé en France par arrêté ministériel sur la base des dommages constatés au regard des mesures habituelles de prévention. Sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles, les dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises *(Code des assurances)*.

La gestion de l'environnement et de la société par l'Homme contribue à modifier l'impact d'un évènement. De plus, le développement des nouvelles technologies, des médias et la mondialisation contribuent à biaiser la perception des citoyens sur l'évolution des évènements climatiques extrêmes puisque, de nos jours, tous les évènements climatiques extrêmes sont relatés par les journalistes, quel que soit le lieu (Pakistan, Inde, Australie, Chili, Argentine…) alors que quelques décennies auparavant, la couverture médiatique des évènements extrêmes n'étaient pas mondiale mais régionale.

EN SAVOIR +

Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique à l'intention des décideurs, GIEC, 2012
www.ipcc-wg1.unibe.ch/srex/downloads/SREX_SPM_French.pdf

CE QU'IL FAUT RETENIR

➔ Un événement météorologique et climatique extrême est un événement rare selon des critères de référence statistique. Cela ne signifie pas que ses conséquences soient forcément catastrophiques.

➔ Ce sont les conditions environnementales et de gestion de l'événement qui interviennent directement sur l'ampleur de ces conséquences.

➔ En l'état des connaissances scientifiques, comportant encore une assez grande incertitude, l'évolution pressentie d'ici la fin du XXIe siècle des événements extrêmes en lien avec le réchauffement climatique sont :

- une élévation prononcée des températures extrêmes,
- une augmentation de la fréquence de fortes précipitations dans les hautes latitudes et les zones tropicales et, en hiver, dans les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord,
- une intensification de la sécheresse au cours de certaines saisons dans le Sud de l'Europe et la région Méditerranéenne, Europe centrale, Centre de l'Amérique du Nord, Amérique centrale et Mexique, Nord-Est du Brésil et Afrique australe), en raison de la baisse de la pluviosité et/ou de la hausse de l'évapotranspiration,
- une aggravation des risques cycloniques, non par l'augmentation de leur fréquence, mais par l'aggravation de leur intensité.

Bibliographie

Ouvrages

ACADEMIE DES SCIENCES, Rapport, Le changement climatique, 2010, 21 p.

ARNOULD P et SIMON L., Géographie de l'environnement, Paris, Atout géographique, 2007, 303 p.

BARD E., L'Homme face au climat, Paris, Odile Jacob, 2006, 446 p.

BEAUX J-F., L'environnement, Nathan, 2004, 160 p.

BENISTON M., Changements climatiques et impacts, de l'échelle globale à l'échelle locale, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2009, 243 p.

BENISTON M., l'effet papillon et le climat, où comment le chaos rend difficile la prévision de l'évolution climatique, musée cantonal des Beaux arts, Climats, Suisse http://www.climats.ch/articles/BENISTON.pdf

BERGER A. et LOUTRE M.-F., De la théorie astronomique au réchauffement global, dans L'Homme face au climat, édité par E.Bard,pp.15-33, Odile Jacob, Paris, 2006.

BLIEFERT C. et PERRAUD R., Chimie de l'environnement, Bruxelles, De Boeck, 2004, 477 p.

BOURRELIER PH. et DUNGLAS J. , Des événements naturels extrêmes aux figures de la catastrophe, Revue Responsabilité & Environnement n° 56 oct. 2009

CHAPPELAZ J., GODARD O., HUET S. et LE TREUT H., Changement climatique : les savoirs et les possibles, La ville brûle, 2010, 239 p.

DELMAS R., CHAUZY S., FERRE H. et VERSTRAETE J-M., Atmosphère, océan et climat, Paris, Belin, 2007, 287 p.

DUCROUX et al., 2001 et DUCROUX A-M., Les nouveaux utopistes du développement durable, Paris, Les Éditions Autrement, 2002

FAUCHEUX S. et NOEL J-F., Les menaces globales sur l'environnement, Paris, La Découverte, 1990, 123 p.

FELLOUS J-L. et GAUTHIER C., Comprendre le changement climatique, Paris, Odile Jacob, 2007, 297 p.

FIEUX M., L'océan planétaire, Paris, ENSTA, 2010, 421 p.

GIEC, Rapport du Groupe de travail I - Les éléments scientifiques, 2007.

GIEC, Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique à l'intention des décideurs, 2012

GODARD A et TABEAUD M., Les climats : mécanismes, variabilité, répartitions, Paris, Armand Colin, 2004, 217 p.

GOUBANOVA K., Thèse : Étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution futur, Université de Paris 6, 2007, 121 p.

GRINEVALD J., La Biosphère de l'Anthropocène, climat et pétrole la double menace, Georg, 2008, 293 p.

JACQUES G., Virer de bord ; plaidoyer pour l'Homme et la planète, L'Harmattan, 2011, 139 p.

JACQUES G. et SAUGIER B., Les puits de carbone, Lavoisier, 2008, 171 p.

JOUZEL J., Le climat : jeu dangereux, Paris, Dunod, 2007, 220 p.

LEROUX M., La dynamique du temps et du climat, Paris, Dunod, 2004, 368 p.

LE TREUT H., Nouveau climat sur la Terre, Paris, Flammarion, 2009, 233 p.

MACKENZIE A., BALL A-S. et VIRDEE S-R., Ecologie, Berti, 2000, 368 p.

MARECHAL C. et MELIERES M-A., Climat et société, Grenoble, Focus, 2010, 366 p.

MARNAS F., Mesure du dioxyde de carbone atmosphérique par Lidar DIAL : Préparation d'une future mission spatiale [en ligne]. Thèse de doctorat d'université, Paris : Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) / Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), 2009, Disponible sur http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/55/PDF/thesefinale_marnas.pdf (consultée le 30-03-2011)

MASSON-DELMOTTE V., Climat : le vrai et le faux, Paris, Le Pommier, 2011, 203 p.

MAUGENDRE M., Étude des particules de suie dans les flammes de kérosène et de diester, 2009

RAMADE F., Éléments d'écologie, Paris, Mc Graw-Hill, 1991, 403 p.

SOUCHEZ R., Les glaces polaires et le rôle de l'homme sur l'atmosphère, Bruxelles, Académie royale de Belgique, 2010, 125 p.

Articles

BERNOUX M.1, FELLER C.2, ESCHENBRENNER V.2, CERRI Carlos C.3, CERRI Carlos E. P.3, Séquestration du carbone dans le sol :
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers10-02/010034958.pdf

COMETTI G., "1. Le réchauffement climatique", in Réchauffement climatique et migrations forcées: le cas de Tuvalu ("eCahiers"), [En ligne], mis en ligne le 09 mai 2011, consulté le 19 mai 2011. URL : http://iheid.revues.org/209

DE WEVER P., "Les leçons de l'histoire géologique et des grandes extinctions d'espèces", Responsabilité & Environnement, n°56, Octobre 2009, p.20-24.

ESCARGUEL G., "Climat, adaptation, évolution et biodiversité", Responsabilité & Environnement, n°56, Octobre 2009, p.25-33.

GRANDJEAN A., "Critique de la raison productiviste", Ceras - revue Projet n°324-325, Décembre 2011.

GRINEVALD J., STEFFEN W., CRUTZEN P. and McNEILL J., "The Anthropocene : conceptual and historical perspectives",in Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2011, n° 369, p. 842-867.

LOCATELLI B.et LOISEL C., "Changement climatique : la vérité est-elle au fond du puits ?", Natures Sciences et Sociétés, vol.10, n°4, 2002, p.7-19.

KARUMBIDZA et MENNE, Mécanisme de développement impropre, Notes de recherches sur l'impérialisme «vert» dans les hauts plateaux du Sud tanzanien, 2010

MEIER W. et STROEVE J., National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder, 2013

ROBERT M. et SAUGIER B., C.R. Geoscience 335, 2003, p. 577-595.

Conférences

TABEAUD M. (2010), "Climat, énergie et développement durable", Forum enseigner le développement durable, Paris, 27 mars.

Figures et tableaux

Figure 1 : Cycles de Milankovicth. P est la précession des équinoxes, E l'excentricité de l'orbite de la Terre et T est l'obliquité de l'axe de rotation. D'après http://ossfoundation.us.

Figure 2 : Influence de l'Oscillation Nord Atlantique sur la trajectoire des masses d'air. D'après M.Visbeck, Columbia University, USA

Figure 3 : Reconstructions des anomalies de température à l'échelle du globe et de chaque hémisphère par rapport à la moyenne 1961-1990. D'après Marcott et al, 2013

Figure 4 : Répartition à la surface de la Terre des 10 932 stations de mesure. D'après Conférence Climat, Energie, Développement durable, donnée par Martine Tabeaud, le 27 mars 2010 à l'institut de Géographie, Paris lors du Forum : Enseigner le développement durable

Figure 5 : Anomalies de la température moyenne entre 1850 et 2010 pour l'ensemble du globe par rapport à la période de référence 1961-1990. D'après le Centre Hadley du Service météorologique national et Section de recherche sur le climat de l'Université d'East Anglia, Royaume-Uni

Figure 6 : Moyenne annuelle mondiale des températures relevées (points noirs) avec ajustement simple par rapport aux données. D'après IPCC, 2007, WGI, FAQ 3.1

Figure 7 : Évolution de la température - tendances de 1901 à 2005 et de 1979 à 2005. D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 3.9

Figure 8 : Températures de l'air observées pour les différentes parties de l'atmosphère. D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 3.17

Figure 9 : Comparaison entre l'évolution des températures mesurées dans différentes régions et à l'échelle mondiale (sur les terres émergées, dans les océans et les deux combinés) et l'évolution simulée par un ensemble de modèles climatiques. D'après IPCC, 2007, WGI, FAQ 9.2, Fig 1

Figure 10 : Énergie rayonnée par le Soleil (à gauche) et par la Terre (à droite) en fonction de la longueur d'onde. D'après Delmas et al., 2007

Figure 11 : Variation de la température, de la teneur en CO2 (ppmv) et en CH4 (ppbv) lors des 220 000 dernières années. D'après Jouzel et al., 1993

Figure 12 : Forçages radiatifs (FR) moyens en 2005 par rapport à 1750 pour les agents et mécanismes importants. D'après IPCC, 2007, WGI, Fig 2.20

Figure 13 : Cycle biogéochimique du carbone. D'après : IPCC, 2007, WGII, Fig 1.3

Figure 14 : Sources de CO2 dues à l'activité humaine (en haut) et portions absorbées par les puits de carbone (océans et végétation) et l'atmosphère (en bas). D'après J. G. Canadell et al, PNAS, 2007

Figure 15 : Impacts de l'artificialisation des sols sur les habitats et les cycles du carbone et de l'eau. D'après SOeS-Gis Sol, 2010

Figure 16 : Moyenne annuelle mondiale du niveau de la mer. D'après IPCC, 2007, WGI, fig 5.13

Figure 17 : Anomalies de couverture neigeuse correspondant à l'écart constaté chaque mois avec la moyenne glissante annuelle. D'après l'Agence européenne pour l'environnement, 2006, à partir de données NOAA et PNUE.

Figure 18 : Évolution depuis 1953 des bilans de masse cumulés moyens des principaux glaciers. D'après Francou et Vincent, 2007

Figure 19 : Anomalie de surface des glaces de mer dans l'hémisphère Nord entre 1953 et 2013. D'après Walt Meier and Julienne Stroeve, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder, 2013

Figure 20 : Stades de développement du riesling en Alsace. D'après Duchêne et Schneider, 2005

Figure 21 : Les grandes crises d'extinction de la biodiversité. D'après Barbault, 2000 p. 43, tiré de CNRS

Figure 22 : Nombre de tempêtes observées chaque année de 1950 à 1999 sur la France. D'après Météo France

Figure 23 : Détermination schématique des notions essentielles intervenant dans les relations d'influence entre phénomènes météorologiques et climatiques, et probabilité d'une catastrophe. D'après Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique à l'intention des décideurs, GIEC, 2012

Tableau 1 : PRG des six GES du protocole de Kyoto. D'après IPCC, 2007

Quelques définitions ont été empruntées au site de l'encyclopédie libre www.wikipedia.org

Remerciements

Rédaction :
Guillaume GUIN (2011),
avec Laurence MONNET et Pierrick YALAMAS, Rhônalpénergie-Environnement

Sont remerciées ici toutes les personnes qui ont contribué à la relecture et l'enrichissement du document.

Ces remerciements vont en particulier à Roland SOUCHEZ, Glaciologue des régions polaires, professeur émérite de l'Université de Bruxelles, membre de l'Académie Royale de Belgique, qui a porté un regard scientifique sur les explications.

Comité de lecture :
Evelyne BERNARD, DREAL Rhône-Alpes
Suzanne BRAKEL, ALEC 42
Christophe CHAIX, MDP
Cécile COISPLET, Conseil régional Rhône-Alpes
Benjamin EINHORN, PARN
Murielle EXBRAYAT, Agence de l'eau RMC
Michel GALLIOT, ONERC
Gérald GIRAUD, CNRM Météo-France
Anne LUMINET, Rhônalpénergie-Environnement
Yannick PAPAIX, ADEME
Catherine PREMAT, Rhônalpénergie-Environnement
Vincent ROGER, Communauté de Communes du Pays entre Loire et Rhône
Benoît RONEZ, Cerema, Direction technique Territoires et ville
Peter SZERB, Rhônalpénergie-Environnement
Sabrine BERTHAUD, Rhônalpénergie-Environnement

Les informations contenues dans cet ouvrage peuvent être réutilisées sous réserve de la mention aux références, aux auteurs et aux partenaires.

Cette brochure est téléchargeable sur les sites de Rhônalpénergie-Environnement
www.ddrhonealpesraee.org
www.raee.org

et du Cerema
www.certu-catalogue.fr

RHÔNALPÉNERGIE-ENVIRONNEMENT

Le Stratège - Péri
18, rue Gabriel Péri - 69100 Villeurbanne
T. 04 78 37 29 14 - raee@raee.org

+ www.raee.org

Avec le soutien de :

Autres partenaires

Janvier 2014 - Conception : www.kineka.com