



<http://www.clubdesargonautes.org>

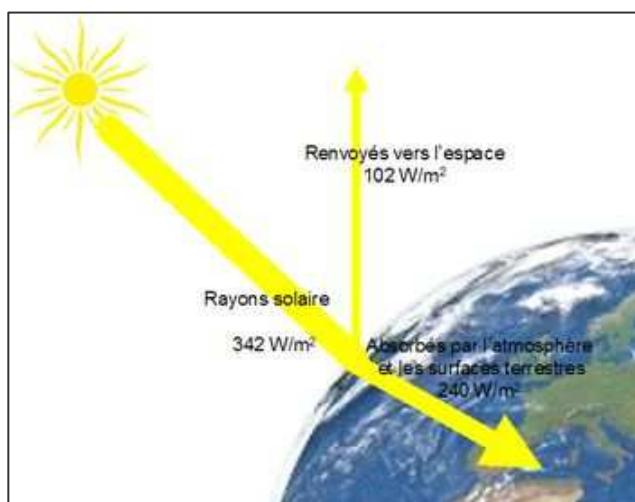
## Le changement climatique : histoire et enjeux

Jacques Merle, Bruno Voituriez, Yves Dandonneau,  
Club des Argonautes

Mars 2013

### Chapitre I : Le système climatique et ses acteurs

Le système climatique est une machine qui fonctionne principalement à l'énergie solaire.



Au sommet de l'atmosphère terrestre ce sont en moyenne  $342 \text{ W/m}^2$  qui sont disponibles.

L'atmosphère, les surfaces terrestres y compris l'océan et les glaces en réfléchissent environ 102, soit 30% du total, qui sont renvoyés dans l'espace et perdus pour le système climatique.

Restent  $240 \text{ W/m}^2$  (70%) pour le faire fonctionner.

Cette énergie est absorbée par les différents compartiments du système :

- l'atmosphère,
- l'océan,
- les continents,
- le milieu vivant
- et même la glace qui pourtant réfléchit 90% de l'énergie qui arrive à sa surface.

Chacun de ces éléments du système stocke l'énergie, mais aussi l'échange sous différentes formes avec les autres compartiments, en tout premier lieu avec l'atmosphère qui est le seul milieu à avoir une interface avec tous les autres et dont les propriétés nous servent à définir le climat puisque nous y vivons.

Compte tenu de sa sphéricité, l'énergie reçue du soleil est très inégalement répartie à la surface de la Terre : maximale dans les régions équatoriales elle est très faible aux pôles.

De plus elle varie saisonnièrement en chaque point du globe en raison de l'angle que fait l'axe de rotation de la Terre sur le plan de son orbite autour du Soleil, l'écliptique.

**Cette inégale répartition de l'énergie solaire en latitude est corrigée grâce aux deux fluides du système climatique que sont l'atmosphère et l'océan.**

Les gradients méridiens de pression que ce différentiel thermique engendre entre l'équateur et les pôles les mettent en mouvement et ils transportent ainsi une grande partie de l'énergie solaire qu'ils ont absorbée, des basses vers les hautes latitudes. Le transport thermique à l'équateur en direction des pôles pour l'ensemble des deux milieux fluides, atmosphère et océan, et pour l'ensemble de la planète, est de l'ordre de 4 Péta Watts.

Dénomination	Unité de base multipliée par	Symbole
Kilo	x 1000 ou $10^3$	k
Méga	x 1 000 000 ou $10^6$	M
Giga	x 1 000 000 000 ou $10^9$	G
Téra	x 1 000 000 000 000 ou $10^{12}$	T
Peta	x 1 000 000 000 000 000 ou $10^{15}$	P

A cela, on doit ajouter d'autres forçages :

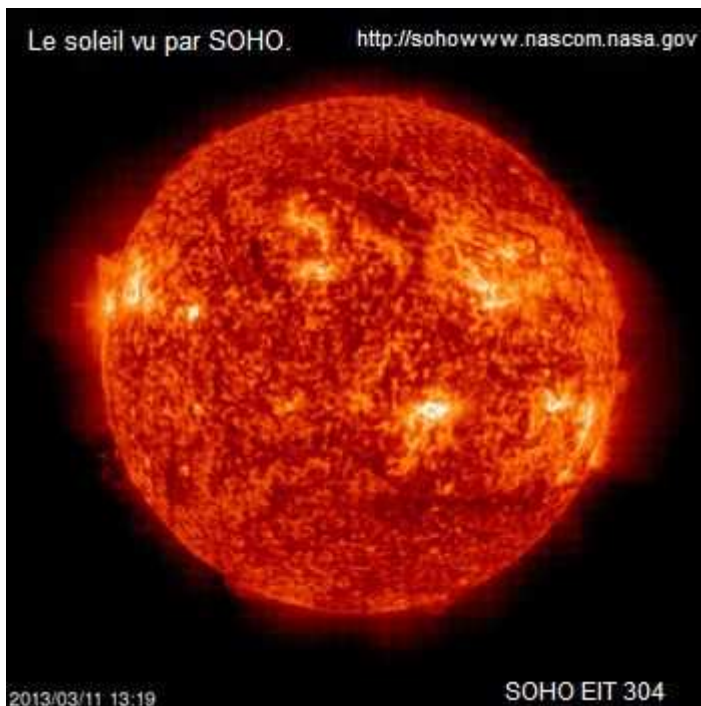
- internes comme l'activité volcanique et la rotation de la Terre sur elle-même
- et externes comme l'énergie gravitationnelle de la lune et du soleil, qui via la marée et la dissipation de son énergie influe sur la circulation océanique.

Les différents milieux qui constituent le système climatique interviennent à des échelles spatiales et temporelles très variables avec de multiples boucles d'interactions qui rendent l'analyse du rôle spécifique de chacun d'eux très difficile à cerner totalement. Le comportement chaotique d'un système interactif aussi complexe rend difficile la prévision de leur évolution et il est nécessaire d'exposer brièvement les caractéristiques de ces différents milieux et leur implication dans le climat et sa variabilité.

## Le Soleil

On a vu que le Soleil est le pourvoyeur principal, sinon exclusif, de l'énergie apportée au système climatique (99,99%) de toute l'énergie apportée à notre environnement.

En effet, l'énergie géothermique, issue des réactions nucléaires des profondeurs du manteau terrestre, ne représente que 0,01% de l'énergie totale alimentant le système terrestre et le climat. Cependant ces chiffres sont à revoir car on a récemment mis en évidence qu'une partie du potentiel énergétique de la marée, l'onde dite [M2](#) dans laquelle intervient préférentiellement la Lune, servait à maintenir la circulation océanique profonde telle qu'elle est observée et représentait donc une source d'énergie pour la circulation océanique.



Le soleil irradie un flux électromagnétique moyen de 1 366 Watts par  $m^2$ , appelé improprement la « constante solaire » car elle varie dans le temps, qui, rapportée à la surface terrestre moyenne exposée à ses rayons, représente un flux électromagnétique au sommet de l'atmosphère de  $342 W/m^2$  (Ce chiffre est égal au rayonnement solaire total divisé par 4, rapport entre la surface d'une sphère et la surface de son grand cercle). Mais cette « constante solaire » varie. La plus remarquable de ses variations est un cycle de 11 ans connu depuis longtemps, avec des variations d'une amplitude d'environ 0,1 %, mais cependant suffisante pour marquer sa trace dans certains paramètres météorologiques.

Il existe aussi des variations de ce rayonnement solaire total à plus long terme, encore mal connues, et dont certains scientifiques suspectent l'influence possible sur le climat.

Par ailleurs l'intensité de ce flux électromagnétique, variable dans le temps, l'est

aussi en fonction de sa composition spectrale. On connaît assez bien ce qui se passe dans le visible et l'infrarouge, mais plus mal dans l'ultraviolet dont les variations en intensité pourraient se situer dans une fourchette de 1 à 4.

Au delà de ses variations saisonnières, réparties en fonction de la latitude, l'énergie électromagnétique

solaires reçue par la Terre dépend aussi, dans le long terme à l'échelle des millénaires, de sa position et de son orientation par rapport au Soleil.

Elle peut varier de quelques % en fonction de 3 paramètres astronomiques positionnant la Terre dans le système solaire :

- les variations de l'**excentricité** de l'ellipse, trajectoire de la Terre autour du Soleil, appelée l'écliptique ;
- l'**Oblivité** qui mesure l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur elle-même par rapport au plan de l'écliptique ;
- La **précession climatique** ou **précession des équinoxes** qui fait décrire à son axe de rotation un cône autour d'un axe perpendiculaire à l'écliptique.

Ces variations de positions de la Terre par rapport au Soleil ont une incidence sur le flux solaire reçu par notre planète et sont à l'origine de fluctuations climatiques de périodes voisines respectivement de 100 000 ans, 41 000 ans et 21 000 ans. Ces variations du flux solaire reçu expliquent en partie l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires chaudes du quaternaire (voir plus loin....).

---

## L'atmosphère



L'atmosphère occupe une position centrale dans le climat, c'est une évidence, car elle est la résidence des êtres vivants aérobies, dont bien évidemment l'homme, et elle interagit et échange de l'énergie, mais aussi de la matière dont du carbone, de l'eau et quantité d'autres corps contenus dans ses aérosols, avec tous les autres compartiments du système climatique, océan, glace, surface continentale, milieux vivants.

L'atmosphère représente une pellicule gazeuse moyenne de plus de 50 km d'épaisseur, séparée en deux couches par une transition thermique, la **tropopause**.

La première couche, la **troposphère**, se situe entre la surface et environ 10 à 15 kilomètres d'altitude, elle concentre près des 9/10èmes de la masse totale de l'atmosphère. La troposphère est surmontée par la **stratosphère** jusqu'à 50 kilomètres d'altitude environ .

Au-delà de la stratosphère, on distingue encore trois ultimes couches avant le vide spatial jusqu'à une altitude voisine de 100 Km, qui appartiennent encore à l'atmosphère. Ce sont, la mésosphère, la thermosphère et l'exosphère.

Pour 99% de sa masse cette atmosphère est composée de trois gaz principaux :

- l'azote pour 77%,
- l'oxygène pour 20%
- et l'argon associé à quelques autres gaz rares pour 2%,
- le reste, environ 1%, est composé principalement de gaz à effet de serre (GES), dont, parmi ces 1% et toujours en masse :
  - 54% de vapeur d'eau,
  - 40% de gaz carbonique,
  - 2% de méthane,
  - 2% de dioxyde nitreux,
  - 2% d'ozone et de CFC.

Sur le plan énergétique, moins de 30% du flux radiatif solaire arrivant au sommet de l'atmosphère est absorbé par celle-ci (un peu moins de  $70 \text{ W/m}^2$ ), ce qui fait que l'atmosphère est un milieu presque transparent pour le flux solaire incident.

Par ailleurs cette couche gazeuse qui nous enveloppe possède une capacité de stockage de la chaleur très réduite. **La capacité thermique de l'atmosphère est environ 1 000 fois inférieure à celle de l'océan.**

Ceci est dû à deux facteurs :

- sa masse, très inférieure à celle de l'océan (seulement 1/250èmes de la totalité de celle de l'océan)
- et sa chaleur spécifique également inférieure à celle de l'océan pour environ 1/4 de celle-ci.

Néanmoins, sur le plan de sa dynamique et du fait de ses caractéristiques thermodynamiques (densité, viscosité...), **l'atmosphère est animée de mouvements rapides (les vents) responsables de la moitié du transport de chaleur de l'équateur vers les pôles à part égale avec les océans.**

Le gaz carbonique et le méthane sont les deux principaux gaz à effet de serre produits par l'activité humaine, la vapeur d'eau relevant quant à elle de processus seulement naturels.

Le GIEC dans son quatrième rapport de 2007 estime que pendant la période allant de 1999 à 2005, les émissions de carbone carbonique dues aux carburants fossiles, et à la production de ciment (qui dégaze le carbonate des roches et en fait du  $\text{CO}_2$ ) sont passées de 6,5 à 7,8 Gt C/an (Giga tonnes de carbone par an), auxquelles s'ajoute 1,8 GtC/an du fait du changement d'utilisation des sols (notamment la déforestation). Cependant, le contenu atmosphérique ne s'accroît que de la moitié environ, l'océan en absorbant 2,2 Gt C/an et la biosphère terrestre 2,6 GtC/an. Les émissions évoluent rapidement à la hausse en 2012, celles de  $\text{CO}_2$  (carburant fossile et ciment) ont atteint 9,7 Gt C/an et elles augmentent de près de 3% par an.

*Les émissions de gaz carbonique sont exprimées, soit en Gt C/an, soit en Gt  $\text{CO}_2$ /an.  
Le  $\text{CO}_2$  comprend un atome de carbone de masse atomique 12 pour deux atomes d'oxygène de masse atomique 32 ( $16 \times 2$ ), soit une masse totale de 44.  
Il existe donc un rapport de  $44/12$ , soit 3,67 entre la masse de gaz carbonique et la masse de carbone, correspondant à la relation entre les deux unités Gt  $\text{CO}_2$  et Gt C/an.  
L'unité la plus fréquemment utilisée est la Gt C/an.*

*L'effet de serre est le réchauffement de l'atmosphère terrestre résultant de l'absorption par des composés comme la vapeur d'eau ou le  $\text{CO}_2$  du rayonnement infra rouge émis par la Terre.  
Cet effet naturel assure à la Terre une température moyenne de  $15^\circ\text{C}$  au lieu de  $-18^\circ\text{C}$ .  
Les activités humaines accroissent cet effet de serre et peuvent ainsi modifier le climat.*

**Bien que représentant seulement 0,001 % de toute l'eau répandue à la surface de la Terre, l'eau atmosphérique joue un rôle fondamental dans le climat. C'est elle, via l'effet de serre qu'elle génère, qui assure à la Terre un climat bien tempéré où la vie peut s'épanouir.**

Issue principalement de l'évaporation qui s'opère à la surface des océans, cette eau est à l'origine de la nébulosité générale de l'atmosphère et des nuages conditionnant la fraction d'énergie radiative solaire incidente qui traverse cette

atmosphère, celle qui est stockée sur place et celle réfléchie vers l'espace. La physique des nuages est très complexe et de nombreuses inconnues demeurent rendant difficile la modélisation des nuages, la prévision de leur formation et donc l'albédo de la Terre.

Par ailleurs **la vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre contenu naturellement dans l'atmosphère.** Mais cette eau atmosphérique est présente en très faible quantité ; avec ses 0,001% elle représente une couche de seulement 3 centimètres d'eau si celle-ci était uniformément répartie sur la totalité de la sphère terrestre. D'éventuelles variations de ce contenu en vapeur d'eau, ainsi que sa répartition géographique, doivent donc être connues et anticipées par les **modèles** pour déterminer leur impact sur l'effet de serre, parallèlement à celui généré par les composés carbonés, gaz carbonique, méthane,...etc. C'est une des grandes sources d'incertitudes actuelles de la prévision de l'évolution du climat et de son réchauffement.

Enfin **l'atmosphère est le réceptacle de microparticules, les aérosols**, qui jouent un rôle très important dans la formation des nuages, les précipitations et les modifications de l'albédo de la Terre. Les aérosols sont générés principalement par les océans et l'écume des vagues soumises au vent, mais ils peuvent aussi avoir pour origine les volcans par leurs émissions de gaz et de cendres ainsi que les feux de forêt et nombre d'autres pollutions industrielles. Formés de particules microscopiques de sels, de minéraux, de microcristaux, ou de particules diverses, même inertes chimiquement, ils stimulent la coalescence de gouttelettes d'eau à l'origine des nuages et favorisent les précipitations. Mais les aérosols sont surtout très importants par leur action sur la nébulosité et donc l'albédo de l'atmosphère.

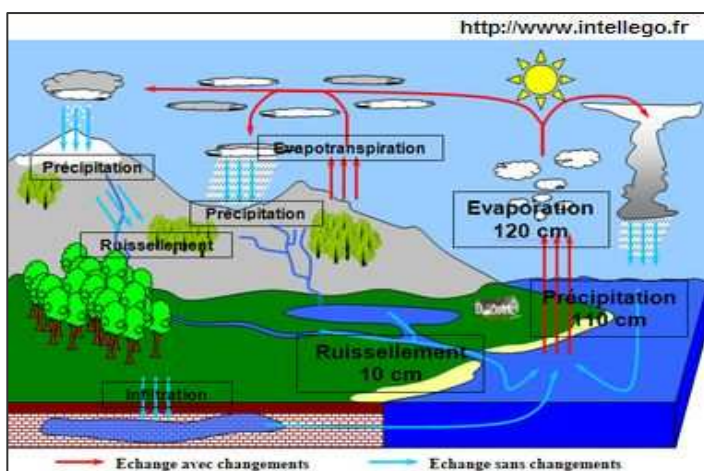
*Les aérosols sont de fines particules en suspension dans l'atmosphère de taille micrométrique d'origine continentale (poussières désertiques, volcans, suie...) ou marines (embruns) qui jouent un rôle important dans la condensation de la vapeur d'eau et la formations de nuages.*

Au total les aérosols contribuent à réduire le flux radiatif solaire incident, apportant ainsi un terme correctif négatif d'environ  $-0,5 \text{ W/m}^2$  dans le bilan net du «forçage» radiatif anthropique qui est de  $1,7 \text{ W/m}^2$ , toujours d'après le 4ème rapport du GIEC.

## L'océan

L'océan recouvre plus de 70% de la surface de la Terre mais fut longtemps considéré comme une «Terra incognita» dont les profondeurs étaient seulement connues, jusqu'à une époque récente, par quelques centaines de «stations» d'observations dédiées aux paramètres océanographiques les plus élémentaires au cours de grandes campagnes transocéaniques : température et salinité à partir desquelles on pouvait déterminer sa densité et approcher sa dynamique.

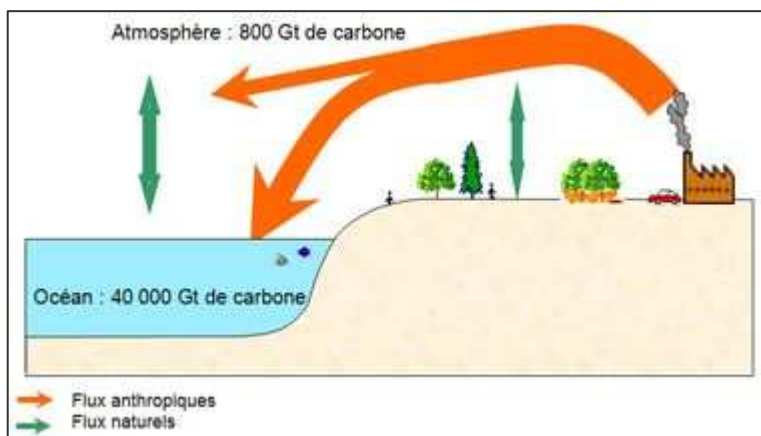
Si les courants de surface étaient assez bien connus grâce à la navigation, les profondeurs océaniques, difficilement accessibles, ont longtemps été considérées comme inertes du fait de la méconnaissance que l'on en avait.



L'océan est avant tout un **gigantesque réservoir d'eau**. L'océan stocke 97% de l'eau contenue à la surface de la Terre.

L'océan est ainsi le **réservoir presque exclusif où s'alimente le cycle de l'eau**. Il restitue en moyenne 120 centimètres d'eau par an à l'atmosphère par évaporation et ainsi la nourrit en vapeur d'eau garantissant à la terre un bienfaisant effet de serre ; c'est une quantité de laquelle il faut retrancher 110 centimètres de précipitation sur l'océan lui-même pour aboutir à un bilan net : évaporation moins précipitation (E-P), d'environ 10 centimètres, qui sert à arroser les continents et qui retourne à l'océan par l'apport des fleuves.

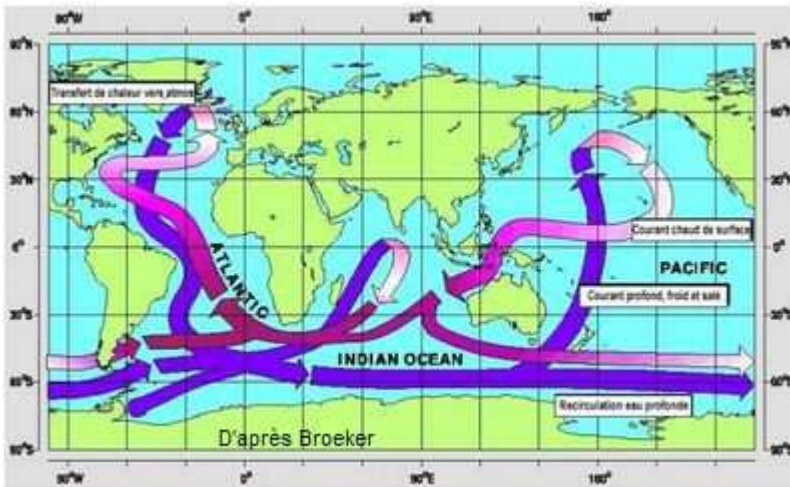
L'océan est aussi le **principal réservoir de carbone** dans le cycle planétaire de cet élément essentiel à la vie et maintenant lourdement impliqué dans l'évolution du climat. Si l'atmosphère contient environ 800 Giga tonne (Gt) de carbone, l'océan en contient 40 000 Gt, soit cinquante fois plus. Par ailleurs la biosphère continentale (forêts, prairies, animaux...) en contient également seulement 800 Gt ce qui fait de l'océan le milieu à la fois le plus central et le plus déterminant vis-à-vis de la dynamique de cet élément.



Ce gigantesque réservoir océanique de carbone est en communication directe avec les autres réservoirs actifs que sont l'atmosphère et la biosphère continentale. Mais il est aussi en relation avec les réservoirs inertes que sont les accumulations sédimentaires des fonds océaniques qui deviendront, à l'échelle des millions d'années, des formations géologiques carbonatées.

L'océan est aussi le milieu qui stocke le plus d'**énergie solaire sous forme de chaleur**. On estime que près de 50%, soit  $168 \text{ W/m}^2$ , du flux radiatif solaire entrant dans le système Terre (atmosphère, océan, continents,...) est absorbé et stocké dans les couches supérieures de l'océan principalement dans les régions tropicales. Cette grande capacité de stockage de l'énergie thermique de l'océan est liée, comme on l'a vu, à sa masse et à sa chaleur spécifique qui conduit à une capacité thermique globale de l'océan près de 1 000 fois supérieure à celle de l'atmosphère.

C'est l'océan qui en restituant une partie de cette énergie à l'atmosphère, principalement par l'évaporation et l'échange thermique associé (chaleur latente d'évaporation), lui fournit l'essentiel de l'énergie nécessaire à sa dynamique.



Mais l'océan par sa dynamique propre est aussi capable de transporter cette énergie. Il le fait, notamment dans le sens méridien depuis les tropiques où la chaleur s'accumule (notamment sur les bords ouest des bassins équatoriaux), en direction des régions tempérées et polaires où elle nourrit l'atmosphère en énergie, participant ainsi, presque à égalité avec l'atmosphère, à l'indispensable rééquilibrage énergétique méridien nécessaire à l'atténuation du contraste thermique tropiques-pôles qui autrement rendrait notre planète presque inhabitable.

---

## La cryosphère

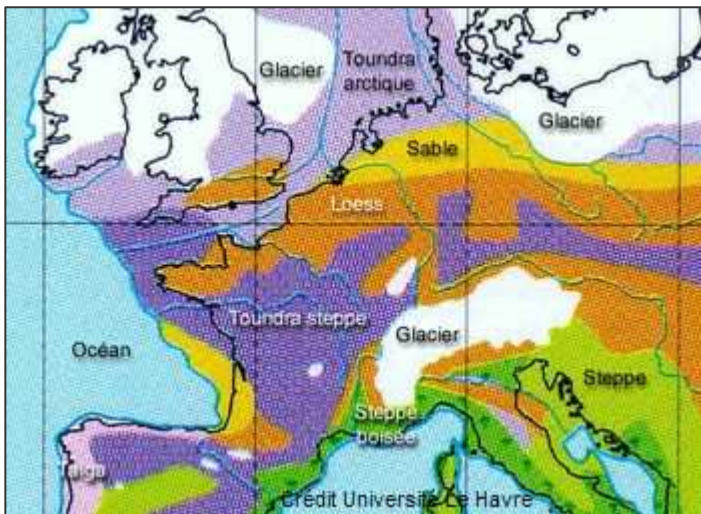
La cryosphère, **ensemble des surfaces englacées**, occupe en moyenne 14% de la surface de la planète.

On distingue plusieurs catégories de couvertures glacées :

- La **glace de mer**, la banquise, d'étendue très variable en fonction de la saison et qui résulte du gel de l'eau de mer à sa surface formant ainsi une couche épaisse de quelques mètres flottant sur l'eau libre ;
- les grandes **calottes polaires** continentales du Groenland et de l'Antarctique ;
- enfin les **glaciers d'altitude** des régions tempérées, voire tropicales.

Un **premier paramètre** caractérisant la cryosphère, important pour le climat, est **sa masse**, qui peut faire varier le niveau des océans de **plus d'une centaine de mètres**.

Ainsi, lors du dernier maximum glaciaire, il y a environ 18 000 ans, le stockage de glace dans les hautes latitudes était tel que le niveau de la mer était abaissé de près de 120 mètres par rapport à ce qu'il est aujourd'hui. Et on a calculé que si la calotte Groenlandaise fondait en totalité, le niveau des océans s'élèverait de 7 mètres environ ; la fonte de la calotte Antarctique entraînerait, elle, une élévation de plus de 60 mètres.



De telles variations du niveau des océans entraînent des modifications importantes dans la géographie et la répartition des continents et des océans. Au cours du dernier maximum glaciaire, la mer du nord et la Manche avaient disparu et les îles britanniques étaient rattachées au continent ; de même le Pacifique nord était fermé au niveau du détroit de Béring mettant en communication la Sibérie avec l'Amérique du nord. De telles modifications de la géométrie des bassins océaniques peuvent avoir des effets très importants sur la circulation générale de l'océan et donc du climat.

*L'image ci-dessus représente l'Europe de l'Ouest au cours du dernier maximum glaciaire, il y a 18 000 ans. Le Pays de Caux, et le Nord de la France étaient recouverts de loess (limon). La Manche était hors d'eau et la ligne de rivage était située à l'Ouest du Finistère. La température moyenne du globe n'était que de 4°C inférieure à la température actuelle.*

Un **deuxième paramètre** rattaché à la cryosphère est son **albedo** ou sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire incident. L'eau de mer et les continents réfléchissent en moyenne environ seulement 20 à 30 % du flux solaire incident, **la glace au contraire en réfléchit 90%** ! La présence de surfaces englacées réduit donc drastiquement la quantité d'énergie absorbée par l'océan ou le continent et est susceptible de modifier à terme de façon considérable la température des régions affectées.

L'étendue des surfaces recouvertes de glace entre donc dans des boucles d'actions-rétroaction, parmi les plus marquées et les plus connues des climatologues, susceptibles d'expliquer en partie des oscillations telles que celles faisant alterner des épisodes glaciaires et interglaciaires chauds à des fréquences principales voisines de 100 000 ans mais aussi à des périodes beaucoup plus courtes de 41 000 et 21 000 ans qui sont d'origine astronomique.

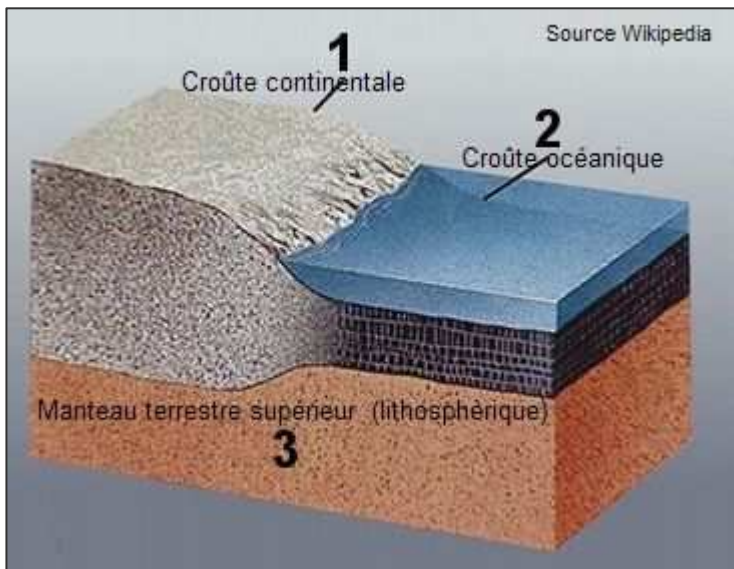
Des oscillations à beaucoup plus courtes périodes, de quelques siècles à quelques dizaines d'années, connues comme étant des phénomènes de «changements climatiques abrupts» semblent s'être manifestés au cours de la dernière glaciation (ce sera traité dans le chapitre X) et être en relation avec la grande sensibilité climatique des régions englacées notamment de l'arctique.

On peut aussi rattacher à la cryosphère le **permafrost des régions sibériennes**, constitué de sols enfouis et gelés en permanence gisant sous la surface soumise à des dégels et des regels saisonniers partiels.

**Ce permafrost est gorgé de méthane** issu des tourbières qui sont à l'origine de ces sols fossiles. Un réchauffement généralisé de ces régions pourrait entraîner un dégel et une libération massive de ce méthane dont on connaît la grande capacité à générer un effet de serre, 20 fois plus important que celui du gaz carbonique rapporté à une masse équivalente.

Enfin **les glaces constituent de très précieuses archives des climats passés**. Des forages profonds dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique et l'analyse des bulles d'air qu'elles contiennent ont permis de mettre en évidence des oscillations thermiques glaciaires-interglaciaires. Elles sont corrélées avec des variations des teneurs en gaz carbonique et en méthane de l'atmosphère de l'époque qui sont à l'origine de la prise de conscience de la relation probable qui existe entre le réchauffement climatique actuel et les émissions de gaz carbonique et autres gaz à effet de serre d'origine anthropique (on en reparlera abondamment plus loin).

## La lithosphère



Dans le fonctionnement du système climatique les surfaces continentales qui stockent peu d'énergie et ne la transportent pas interviennent essentiellement par leur **capacité plus ou moins grande à réfléchir l'énergie solaire** (albédo).

L'albédo des surfaces continentales dépend au premier chef de leur couverture végétale (détaillée dans le paragraphe suivant), mais qui peut aussi varier considérablement sous l'effet de phénomènes tels que la désertification, l'urbanisation, la modification des paysages par des équipements divers tels que les infrastructures, routes, zones urbanisées, barrages hydrauliques ... Elles interviennent aussi sur le **cycle de l'eau par l'humidité ses sols et d'une façon plus générale par les réservoirs d'eau qu'elle contiennent**, rivières, lacs,

eaux souterraines et leur bilan évaporation moins précipitation. Le cycle de l'eau, comme celui du carbone, est au cœur de la machine climatique et ce cycle passe par le domaine continental en interaction avec l'atmosphère et la biosphère.

À long terme la géographie des continents interviennent dans le climat et son évolution de plusieurs façons : d'abord par l'étendue des terres émergées et ensuite par leur situation respective

On a vu par exemple que le niveau de l'océan pouvait varier assez rapidement, modifiant aux marges la géométrie des continents et des océans. Mais à plus long terme encore on sait que les continents dérivent et que la configuration des bassins océaniques change modifiant les circulations océaniques et atmosphériques et donc le climat.

C'est l'affaire des paléo-climatologues et des paléo-océanographes de reconstituer ces climats anciens. Ils utilisent des modèles, pour simuler les schémas de circulation océanique et atmosphérique correspondant à des dispositions géographiques océan-continent différentes de celles de l'époque actuelle et qui étaient celles de périodes géologiques anciennes (plusieurs milliers à plusieurs millions d'années) qu'ils ont pu reconstituer. Ils cherchent à valider et par recoupements et à faire converger les indications des paléo-climats dont ils disposent avec ces schémas de circulation.

À titre d'exemple et sans aller très loin dans le temps, au cours du **dernier maximum glaciaire**, il y a quelques dizaines de milliers d'années, la calotte glaciaire de l'hémisphère nord recouvrait une grande partie de l'Atlantique nord jusqu'à des latitudes moyennes proches de 45-50°N. Cette frontière glace-océan agissait sur la circulation océanique comme une frontière continentale **repoussant vers le sud le courant chaud de la dérive nord Atlantique** qui prolonge le Gulf Stream, entretenant ainsi **un climat froid au nord de cette limite**. Cette configuration modifiait le schéma de circulation océanique de l'Atlantique nord qui rebouclait en direction du sud et des tropiques au lieu de venir lécher et réchauffer les côtes de l'Europe du nord jusqu'aux hautes latitudes des pays scandinaves comme c'est le cas aujourd'hui. Le schéma de circulation générale océanique de l'Atlantique était donc très différent de ce qu'il est aujourd'hui.

**Une géométrie particulière océan-continent détermine, en partie, une circulation océanique et un climat** ; à un climat donné correspondent des schémas de circulations océaniques et atmosphériques particulières qui dépendent aussi de la géographie.

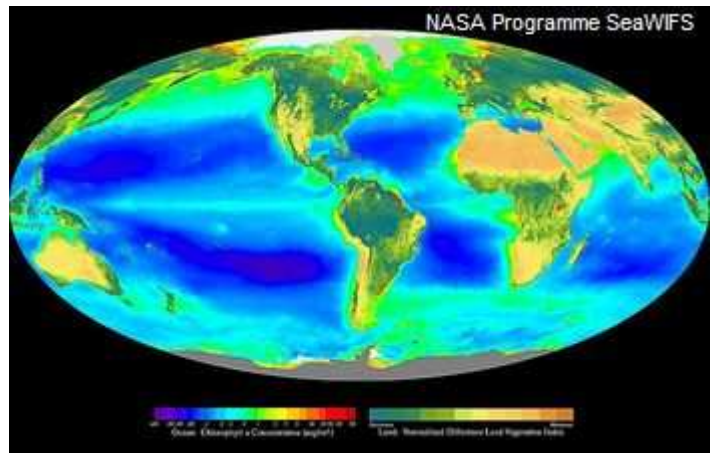


## La biosphère

Le milieu vivant a joué un rôle déterminant dans la composition chimique de l'atmosphère et le climat des premiers âges de la Terre. Peu après sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années, notre planète était invivable avec des températures de plusieurs centaines de degrés Celsius car son atmosphère contenait plus de 30% de gaz carbonique engendrant un effet de serre infernal.

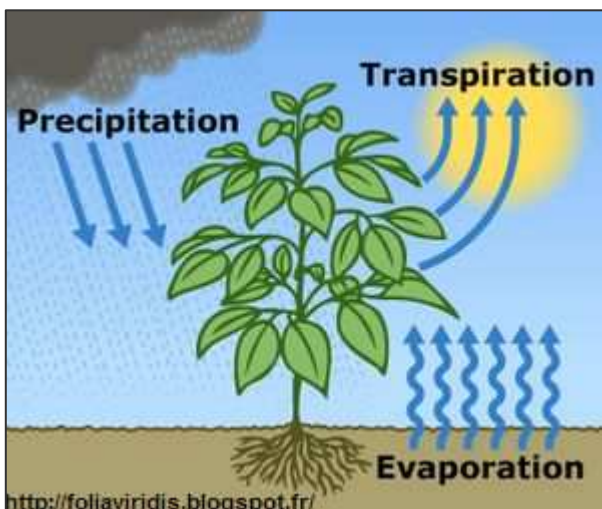
Il fallut attendre 3 milliards d'années pour que des bactéries, les cyanobactéries, réduisent la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère à son niveau actuel (0,4% de l'atmosphère) plus confortable pour le développement de la vie grâce à la photosynthèse qui a produit l'oxygène que nous respirons (environ 20% de l'atmosphère actuelle). On mesure donc l'importance de la biosphère dans la question climatique.

**Les êtres vivants, végétaux et animaux, sont des maillons essentiels du cycle du carbone mais aussi du cycle de l'eau** à la surface des continents et des océans.



L'instrument SeaWifs du satellite Seastar lancé en 1997 a permis d'accumuler des données sur la biosphère. L'image ci-dessus en montre un exemple. Sur les continents, les couleurs vert foncé indiquent une végétation importante. Dans l'océan, le rouge, le jaune et le vert indiquent une forte densité de phytoplancton.

Sur les continents les flux d'eau et de carbone sont indissolublement liés. Il en est de même des sols et du couvert végétal qui sont associés dans les phénomènes de transfert d'eau et de carbone. Les variables climatiques qui contrôlent le couvert végétal sont principalement la température et les précipitations, et plus marginalement la teneur en gaz carbonique de la basse atmosphère qui peut faire varier le taux d'accumulation du carbone dans les végétaux, principalement les forêts. C'est ce qui se produit actuellement du fait des émissions anthropiques qui accroîtraient la croissance des arbres de plus de 20% d'après des observations récentes. A ces paramètres naturels s'ajoutent les actions humaines modifiant par place ce



météorologique assez précisément mesurable localement mais elle reste difficile à intégrer sur des espaces étendus car elle est très variable spatialement.

L'autre phénomène qui domine les interactions continent-biosphère-atmosphère est la **photosynthèse** qui puise dans le rayonnement solaire l'énergie nécessaire pour assimiler le gaz carbonique atmosphérique et stocker le carbone dans des composés organiques variés constituant la matière végétale, notamment le bois. Cette dissociation du dioxyde de carbone s'accompagne d'une libération d'oxygène faisant de ce phénomène un processus doublement bénéfique, en absorbant le gaz carbonique, et en produisant de l'oxygène. **Le réservoir de carbone ainsi accumulé sur les continents principalement dans les forêts**

**est estimé à 800 Giga tonne de carbone, autant que le contenu du réservoir atmosphérique, mais 50 fois moins que le contenu du réservoir océanique.**

Pour un bilan complet, qui en moyenne et à long terme doit être nul en régime permanent, il faut prendre en compte aussi le flux sortant de gaz carbonique issu de la décomposition au sol des débris végétaux, feuilles, branches mortes, ainsi que le déboisement par les feux de forêts et toute les activités humaines portant atteinte au réservoir de carbone de la biosphère continentale. La perturbation anthropique qui apporte au total dans l'atmosphère 7 Gt de Carbone supplémentaires par an par rapport à la période préindustrielle, soit un flux énergétique moyen de près de  $3,1 \text{ W/m}^2$ , est en partie réabsorbée actuellement par la biosphère continentale à un taux voisin de  $0,7 \text{ W/m}^2$ , ce qui représente environ 24 % de l'émission anthropique initiale totale. (Données du 4ème rapport du GIEC de 2007 pour la période s'étendant de l'année 2000 à l'année 2005).

Pour être complet sur la biosphère continentale, on doit ajouter à ce bilan d'échange de gaz à effet de serre entre l'atmosphère et les continents, **les émissions de méthane**, redoutable gaz à effet de serre, 20 fois plus puissant que le gaz carbonique mais heureusement beaucoup moins présent en masse. Ce gaz est en effet rapidement oxydé et sa durée de vie dans l'atmosphère n'est que de quelques années. Il est produit principalement par l'agriculture (culture du riz) et l'élevage des ruminants (bovins...) qui émettent un peu plus de 0,36 Gt équivalent carbone /an de méthane représentant un flux énergétique voisin de  $1 \text{ W/m}^2$ , soit près de 30 % des émissions de gaz à effet de serre produites par l'activité humaine. Le méthane est également extrait industriellement des schistes ou des mines de charbon désaffectées (grisou).

*Tous les gaz à effet de serre (GES) n'ont pas le même temps de résidence dans l'atmosphère, ni le même impact sur le climat pour une quantité de gaz donnée.  
Pour pouvoir cependant évaluer l'influence totale de ces GES, on définit pour chacun d'eux un pouvoir de réchauffement global (PRG) qui caractérise la puissance radiative que le GES considéré renvoie vers le sol.  
Pour pouvoir comparer facilement chaque gaz, on utilise une unité commune conventionnelle : l'équivalent  $\text{CO}_2$ .  
Pour une durée conventionnelle de 100 ans, cette unité permet de convertir 1kg de gaz à effet de serre en kg de  $\text{CO}_2$  équivalent qui produiraient la même perturbation climatique. Par convention, le PRG du  $\text{CO}_2$  vaut 1, le PRG des autres gaz étant exprimé par rapport à ce dernier.  
Par exemple, le pouvoir de réchauffement du méthane calculé sur 100 ans est de 23. Si on émet 1 kg de méthane dans l'atmosphère, on produira le même effet, sur un siècle, que si on avait émis 23 kg de  $\text{CO}_2$ .  
On utilise aussi comme unité l'équivalent carbone qui se déduit de l'équivalent  $\text{CO}_2$  par le rapport des masses atomiques (voir encart plus haut).  
Puisqu'un kilogramme de  $\text{CO}_2$  contient  $1/3,67$  kg de carbone, l'émission d'un kilogramme de  $\text{CO}_2$  vaut  $1/3,67$ , soit 0,27 kg d'équivalent carbone.  
Ainsi,  $0,043 \text{ kg de méthane} = 1 \text{ kg équivalent } \text{CO}_2 = 0,27 \text{ kg équivalent carbone}$*

Mais il existe aussi une **photosynthèse océanique produite par des organismes marins**, souvent microscopiques, qui vont des cyanobactéries aux algues, soumis aux déplacements des eaux superficielles baignées par le rayonnement solaire et désignés génériquement par le terme de phytoplancton. Le phytoplancton est le premier maillon de la chaîne de production de matière vivante marine océanique qui va jusqu'aux poissons et aux grands mammifères marins. C'est un peu l'équivalent des prairies continentales et c'est une entrée majeure de gaz carbonique dans l'océan matérialisant ce qui est parfois appelée sa fonction de «pompe biologique» dans le bilan de l'absorption du gaz carbonique par l'océan. **Cette pompe biologique marine met en jeu environ 50 Gt de carbone par an, et en transfert en moyenne 11 Gt vers l'océan profond (sous la thermocline), ce transfert étant compensé par la remontée en certaines régions d'eau profonde riche en carbone.** Ces quantités sont supérieures aux émissions anthropiques de carbone, mais leur bilan est nul, et le restera tant qu'on n'aura pas détecté de modification de la productivité des océans par rapport à la période de climat stable qui a prévalu avant que le climat se réchauffe.

Cette production primaire de matière vivante par le phytoplancton s'observe dans tout l'océan mais surtout dans des régions bien particulières de l'océan mondial où des eaux plus profondes et riches en sels nutritifs remontent près de la surface (phénomène dit d'upwelling) dans la zone euphotique où le rayonnement solaire apporte l'énergie nécessaire à la photosynthèse. Ce mécanisme, très important dans la réabsorption du gaz carbonique par l'océan, est soumis à une grande variabilité spatio-temporelle et se montre très dépendant de la circulation générale de l'océan et des paramètres météorologiques tels que le vent, qui apporte des éléments terrigènes continentaux fertiles ; mais il peut dépendre aussi de la température, de l'ensoleillement, des précipitations liant ainsi la photosynthèse marine et la production de phytoplancton au climat et à sa variabilité. La question est en effet de savoir si le changement climatique et le changement de circulation vont affecter, en positif ou en négatif, la production primaire marine.