

Le terme de « réchauffement climatique » est aujourd'hui relativement bien intégré dans la société. Il est d'ailleurs peu à peu remplacé par le terme plus juste et moins confondant de « changement climatique » ou encore « dérèglement climatique ».

À la question « Selon vous, les dérèglements climatiques représenteront-ils une menace sérieuse pour vous ou pour votre mode de vie ? » d'un sondage de Mars 2012, **70%** des personnes interrogées, répondaient **oui**. Donc, globalement, on sait que c'est mauvais. Mais on ne sait pas nécessairement pourquoi c'est si mauvais, comment on en est arrivé là et surtout comment sortir de cette situation.

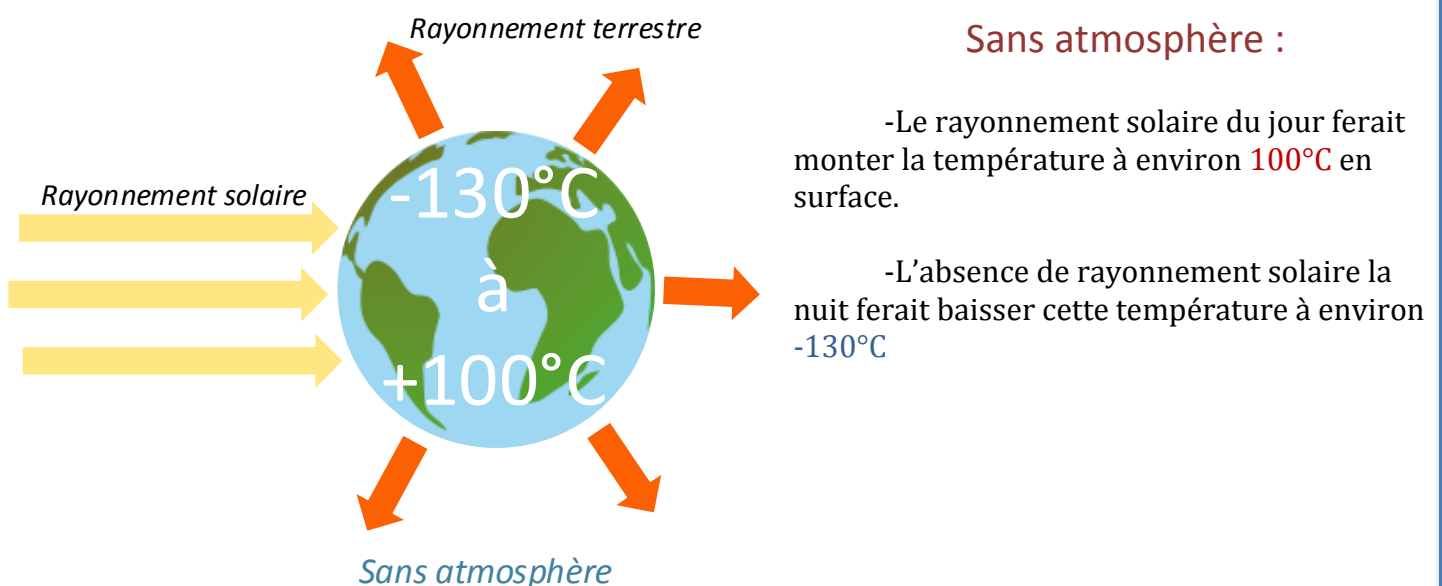
Je propose dans ce chapitre d'expliquer de façon concise, le fonctionnement du climat, l'effet de l'Homme sur celui-ci et les conséquences des dérèglements.

1 // La mécanique complexe du climat

1.1 L'atmosphère et l'effet de serre

C'est bien connu, l'atmosphère de la planète a permis au monde vivant de se développer.

Le premier effet de l'existence de cette couche protectrice est la régulation des rayonnements venant du soleil.

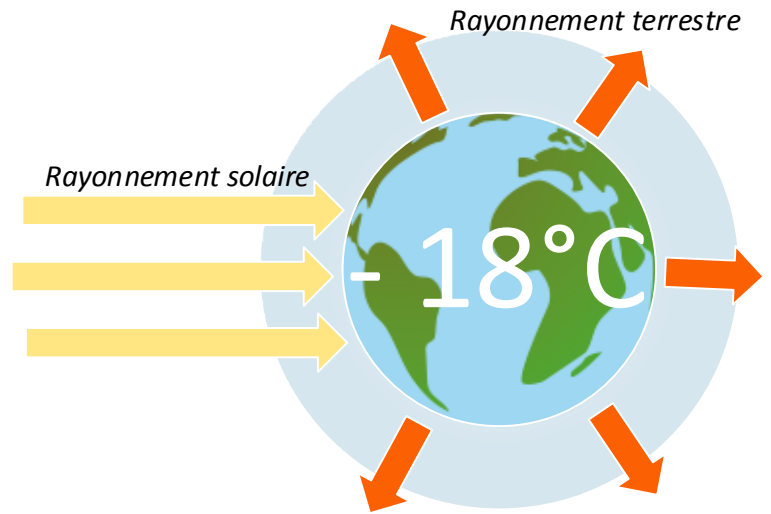


Avec atmosphère :

-la température moyenne se situerait aux alentours de -18°C avec une variation d'amplitude nettement plus faible

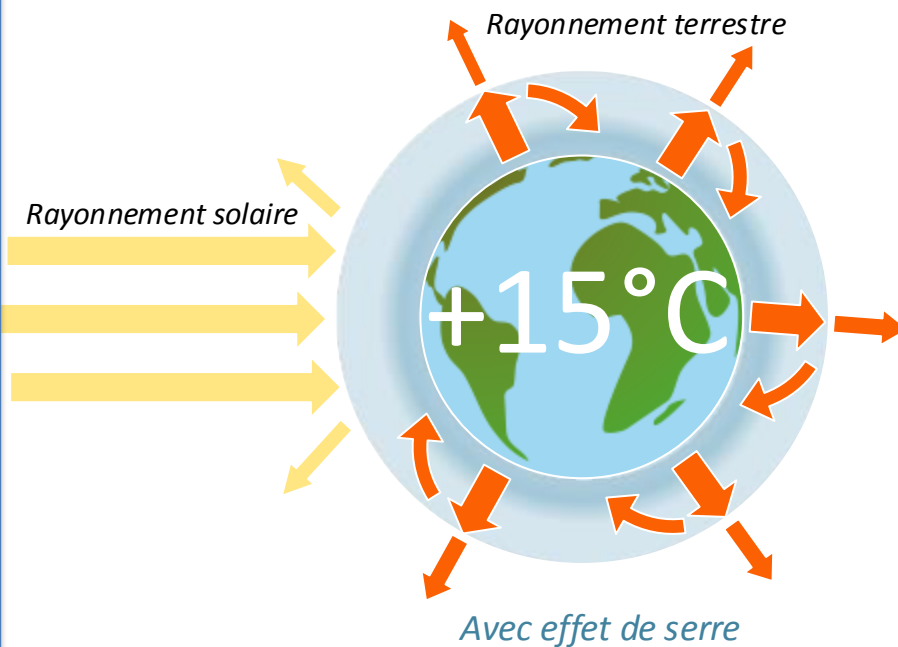
Sans effet de serre :

-la température n'est **que** de -18°C en moyenne ; ce qui rend la planète peu accueillante pour de nombreuses espèces, dont la nôtre...



Avec atmosphère, sans effet de serre

Le deuxième effet de la présence de l'atmosphère autour de la planète est l'existence d'un mécanisme appelé *Effet de serre* qui, lui, régule les rayonnements terrestres.



Avec effet de serre :

-Le rayonnement solaire est en partie réfléchi et en partie absorbé par l'atmosphère et la Terre.

-le rayonnement terrestre est absorbé par les gaz à effet de serre et réémis vers la surface terrestre.

Il en résulte une température moyenne sur le globe de $+15^{\circ}\text{C}$

Schéma simplifié de l'effet de serre

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'effet de serre, zoomons un peu sur la dernière illustration.

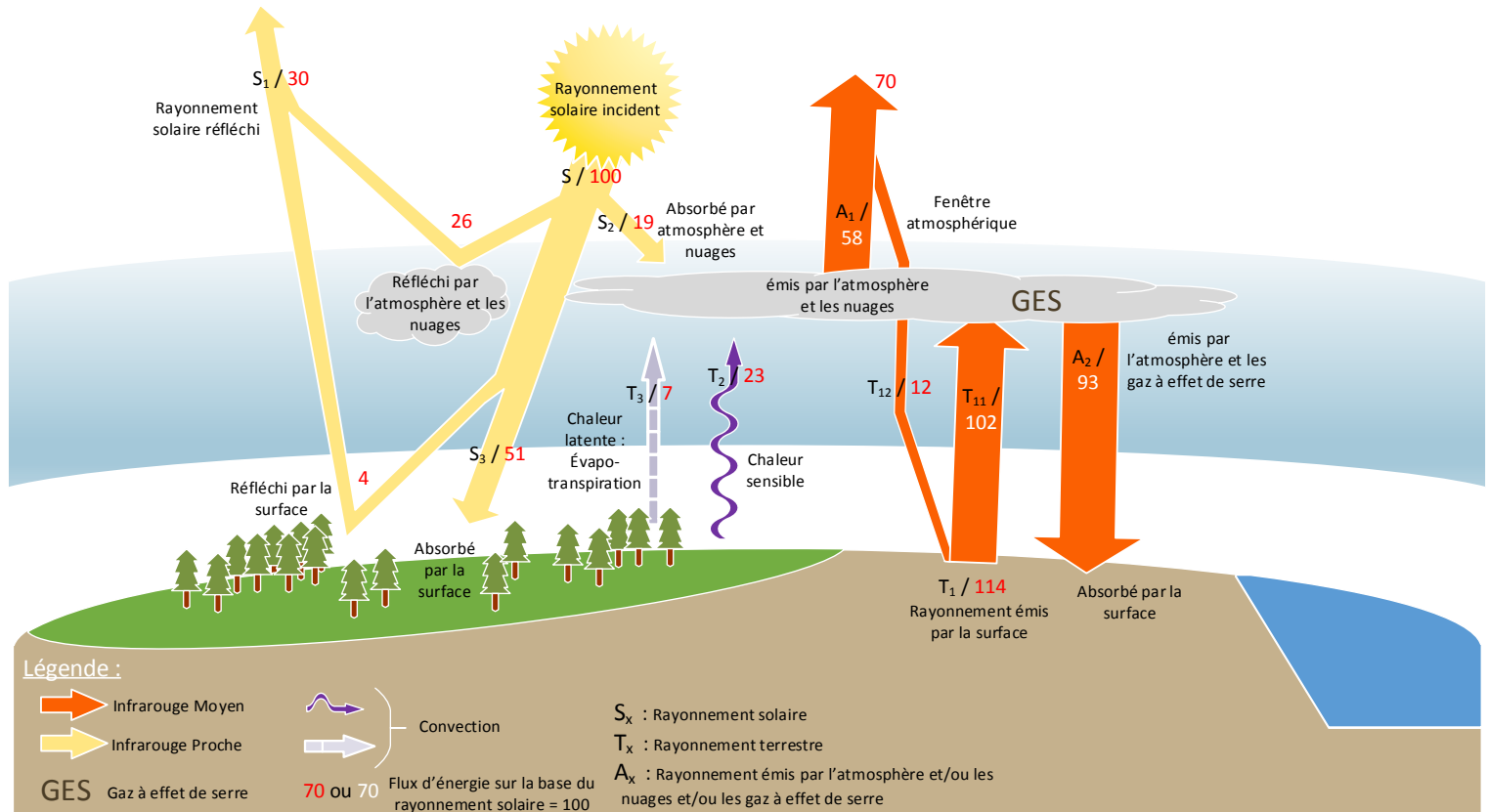


Schéma 1: Fonctionnement simplifié de l'effet de serre

Décomposons simplement ce schéma :

- Le rayonnement **Solaire** est noté **S**
- Le rayonnement **Terrestre** est noté **T**
- Le rayonnement de l'**atmosphère** et/ou des gaz à effet de serre noté **A**

Ces trois types de rayonnement se décomposent suivant qu'ils sont réfléchis, ou absorbés.

Les valeurs en rouge ou blanc représentent la quantité d'énergie. On a pris pour base que le rayonnement solaire incident valait **100**, pour simplifier la lecture du schéma (en réalité il vaut 342 W/m^2).

Le Rayonnement solaire noté S :

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement composé de différents types d'ondes électromagnétiques. Ces ondes n'ont pas toutes les mêmes propriétés.

L'illustration suivante montre les différents types d'ondes électromagnétiques qui existent, ainsi que celles qui composent majoritairement le rayonnement solaire.

Les ondes électromagnétiques

Elles sont classées suivant leur longueur d'onde.
On a ainsi du plus court au plus long :

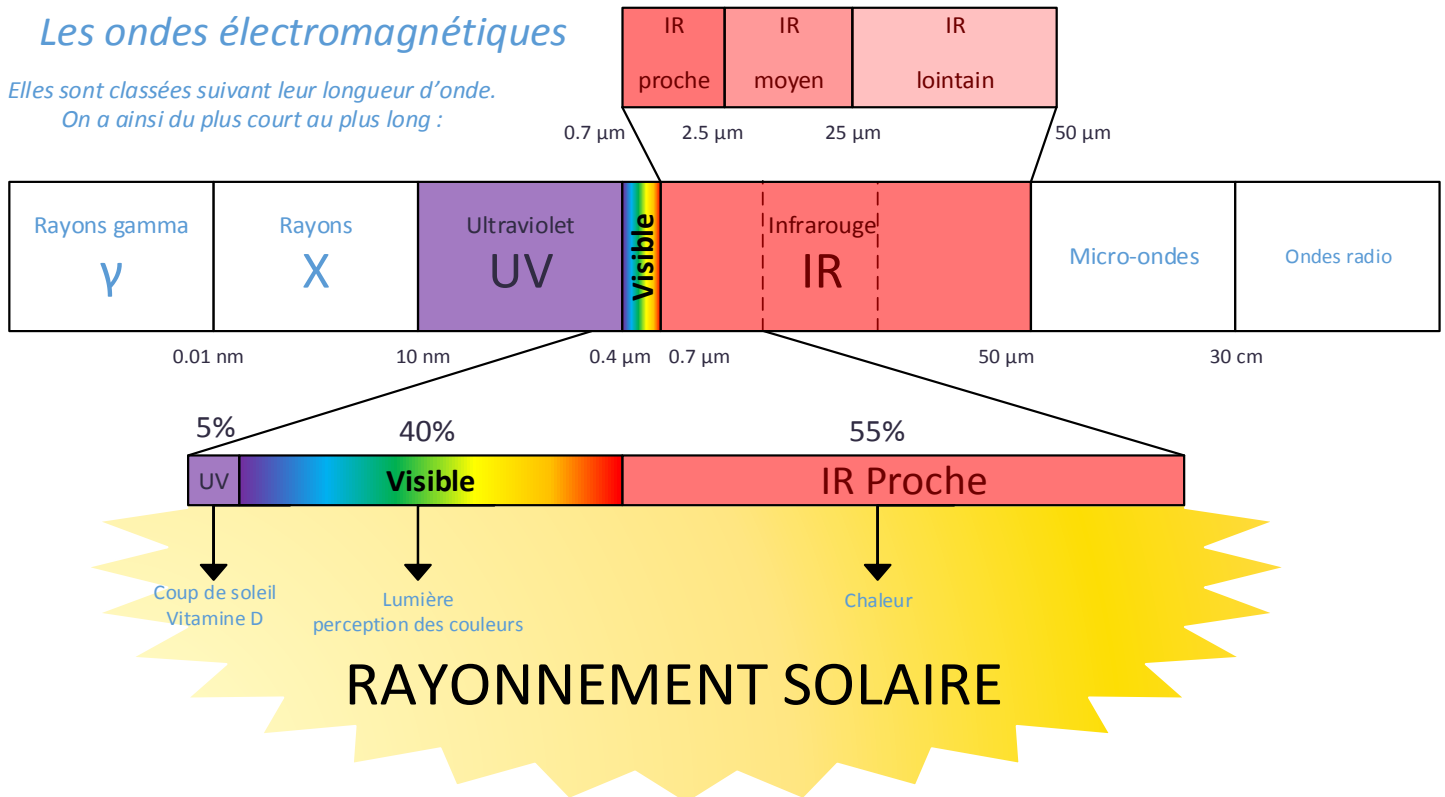


Schéma 2 : Le rayonnement solaire parmi les différents types d'ondes

Le soleil émet ainsi un rayonnement composé de :

- 5% d'Ultraviolet qui peut provoquer des maladies de peau à trop haute dose.
- 40% de Visible qui nous permet de voir ce qui nous entoure.
- 55% d'infrarouge proche qu'on absorbe sous forme de chaleur.

Sur la Schéma 1, n'est représenté que le rayonnement **infrarouge**, donc la « chaleur ».

Ce rayonnement solaire **infrarouge** incident noté **S** va se partager comme suit :

S₁ : 30% du rayonnement est **réfléchi** vers l'espace (26% par l'atmosphère et les nuages et 4% par la surface de la terre. On comprendra aisément que plus la matière est claire (neige, glace) plus les rayons seront réfléchis.

S₂ : 19% du rayonnement est **absorbé** par l'atmosphère et les nuages (ils réagissent comme tout corps qui reçoit un rayonnement infrarouge)

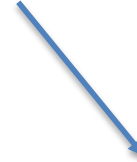
S₃ : 51% du rayonnement est **absorbé** par la surface de la Terre.

Le Rayonnement terrestre noté T :

La terre ainsi chauffée, va à son tour dégager de la chaleur sous forme d'infrarouges.

T₁ : l'équivalent de **114%** du rayonnement solaire **S** est **émis** par la surface de la Terre. La planète n'ayant absorbé que 51% de ce rayonnement, le surplus s'explique par le fait qu'elle produit elle-même de la chaleur en son centre (noyau à environ 5500°C).

T₁ est émis sous forme d'infrarouges **moyens** (donc différents des infrarouges **proches** reçus du soleil).



Une partie **T₁₁** (**102%**) va être **absorbée** par les gaz à effet de serre. Ceux-là ont la particularité d'absorber les infrarouges **moyens** mais de laisser passer les infrarouges **proches**, ce qui explique la différence de traitement entre les infrarouges solaires et terrestres.

C'est ainsi **93%** d'IR moyens (**A₂**) qui sont réémis par les gaz à effet de serre vers la surface de la Terre.



C'est spécifiquement ce mécanisme que l'on appelle « Effet de serre ».

Une autre partie **T₁₂** (**17%**) du rayonnement terrestre s'échappe quant à elle par ce qu'on appelle une **fenêtre atmosphérique**, et part directement dans l'espace.

Mais la Terre (et ses habitants) dégagent également de la chaleur sous d'autres formes :

T₂ : **23%** de **chaleur sensible**. Il ne s'agit plus d'énergie sous forme de rayonnement mais de l'air, qui, au contact de la surface chaude de la Terre, chauffe à son tour et monte dans l'atmosphère.

T₃ : **7%** de **chaleur latente**. C'est ce qu'on appelle l'évapo-transpiration correspondant à l'évaporation des océans et la respiration des animaux et végétaux.

L'atmosphère aura absorbé **S₂**, **T₂** et **T₃** et une petite partie de **T₁₁** (**9%**) soit **58%** que forme **A₁**, qui partent dans l'espace sous forme d'infrarouges moyens.

Mais au fait, c'est quoi un gaz à effet de serre ?

Un gaz à effet de serre (GES) est un gaz qui a la propriété d'absorber les rayons infrarouges moyens, c'est-à-dire, ceux émis par la Terre. Ils sont ainsi plutôt opaques au rayonnement terrestre mais plutôt transparent au rayonnement solaire.

Dit autrement : ils laissent passer l'énergie entrante du soleil, mais bloquent l'énergie sortante de la Terre. D'où une accumulation de chaleur.

Les principaux gaz responsables de l'effet de serre sont classés ci-dessous par proportion.

GES	Durée de vie approximative
La vapeur d'eau (H ₂ O)	1 semaine
Le dioxyde de carbone (CO ₂)	100 ans
Le méthane (CH ₄)	12 ans
Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	120 ans
L'Ozone(O ₃)	Quelques jours à quelques semaines

Exemple de lecture : Une durée de vie de 100 ans signifie qu'il faut 100 ans pour que le CO₂ dégagé se dégrade ou change de stock (on reviendra plus tard sur les stocks).

On appelle aussi la durée de vie, le « temps de séjour » dans l'atmosphère.

Si on compile dans un même indicateur la durée de vie du gaz et sa capacité d'absorption des infrarouges moyens, on obtient le « **Pouvoir de Réchauffement Global** » (PRG). Calculé sur la base du CO₂, il permet de donner l'impact du gaz en termes d'effet de serre en équivalent CO₂.

Ci-dessous, le tableau des PRG des principaux GES.

GES	PRG à 100 ans
Le dioxyde de carbone (CO ₂)	1
Le méthane (CH ₄)	25
Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	298

Exemple de lecture du PRG : sur une période de 100 ans, 1Kg de méthane (CH₄), a un impact 25 fois plus important que 1 Kg de CO₂.

Si, enfin, on tient compte de la quantité de gaz présent dans l'atmosphère, c'est le CO₂ qui se détache nettement devant le méthane ou le protoxyde d'azote. La vapeur d'eau a quant à elle, un cycle bien distinct de celui du carbone et à un temps de séjour très court dans l'atmosphère. On estime de plus, que l'homme n'a qu'un impact très faible sur ce gaz à effet de serre.

Pour résumer...

L'effet de serre est un mécanisme tout à fait naturel et indispensable pour la vie telle qu'on la connaît.

L'effet de serre est le mécanisme par lequel les gaz à effet de serre laissent passer le rayonnement solaire entrant et bloquent le rayonnement terrestre sortant. Le CO₂ et le CH₄ sont les deux GES les plus importants.

1.2 Le cycle du carbone

Ci-dessous le schéma du cycle du carbone.

On voit ainsi l'ordre de grandeur des différents stocks (Végétation, sols et humus – Combustibles fossiles – Océans- vie marine – Atmosphère). On voit également l'ordre de grandeur des échanges entre ces stocks.

On notera donc que ce cycle est le cycle naturel du carbone ; c'est-à-dire sans l'influence de l'homme (nous verrons plus tard quelle est son action sur ce cycle).

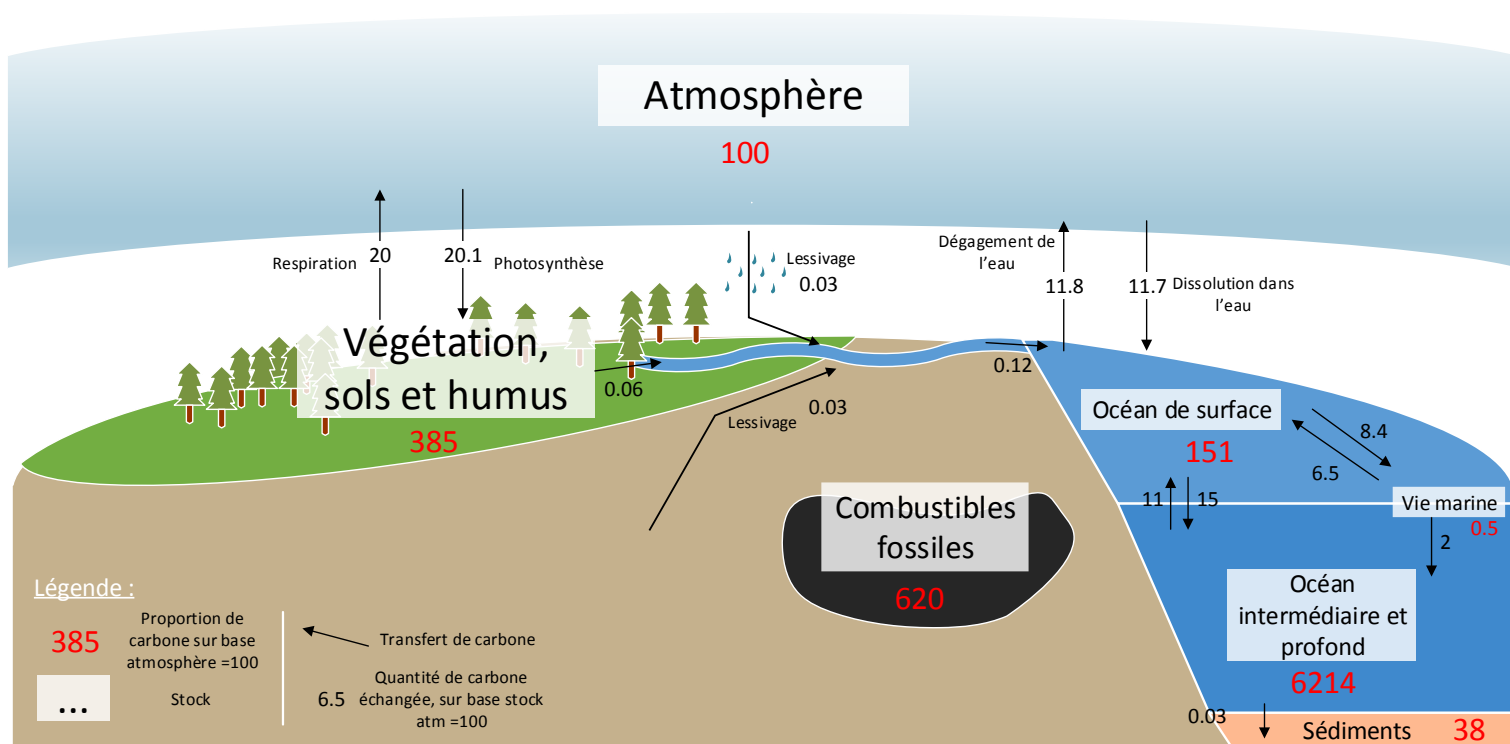


Schéma 3 : Cycle naturel du Carbone

Décomposons simplement ce schéma :

Les valeurs en **rouge** représentent les quantités de carbone contenues dans les stocks.

Les valeurs en **noirs** représentent les échanges entre ces stocks en 1 année.

On a pris pour base que le stock de carbone dans l'atmosphère valait **100** pour simplifier la lecture du schéma (en réalité ce stock représente 597GtC giga tonnes de carbone)

Ces proportions représentent les stocks de carbone et les échangeant naturels tels qu'ils étaient en 1750, donc avant l'ère industriel.

Expliquons les échanges principaux qu'on peut voir sur ce schéma :

La végétation, les sols et l'humus

La végétation, les sols et l'humus ainsi que la vie animale échangent du carbone avec l'atmosphère ; d'une part ils **respirent**, donc relâchent du gaz carbonique ou plus exceptionnellement du méthane. Et d'autre part la végétation absorbe du CO₂ par **photosynthèse**.

Les océans

C'est un peu plus complexe dans les océans ; on remarque d'abord que l'océan profond est le plus gros stock de carbone de la planète.

Mais c'est surtout l'océan de surface qui nous intéresse car il a un rôle très important sur le cycle du carbone. Outre qu'il échange avec la vie marine qui « respire » et avec l'océan profond, sa température est la clé de la régulation des échanges de carbone avec l'atmosphère.

En effet l'eau a la capacité de dissoudre du CO₂ en fonction de sa température ; **plus l'eau est froide, plus l'océan capte du CO₂, et inversement, plus l'eau est chaude, plus il relâche du CO₂ dans l'atmosphère.**

Ainsi l'échange qu'on voit sur le schéma correspond à la mécanique suivante :

L'eau froide au niveau des pôles se charge en CO₂, et, comme l'eau parcourt la planète elle se réchauffe en approchant de l'équateur et va ici rejeter le CO₂ emmagasiné.

Les combustibles fossiles

On notera enfin que le stock de combustibles fossiles (gaz, pétrole, charbon) n'échange pas avec les autres stocks (trop peu pour le visualiser à cette échelle)

Pour résumer...

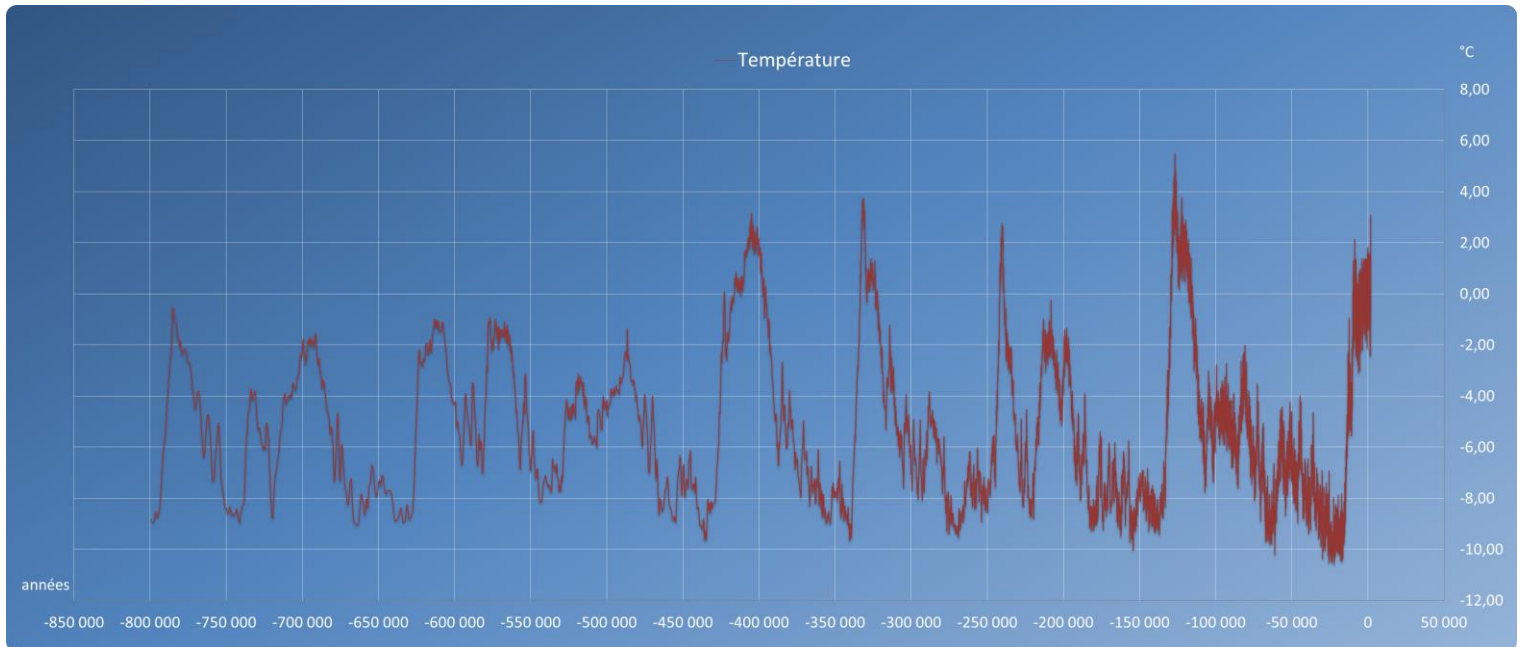
5 stocks de Carbone échangent naturellement entre eux.

L'océan de surface régule le dégagement de CO₂ dans l'atmosphère en fonction de la température.

1.3 Les cycles climatiques

Il est intéressant de se pencher sur le passé du climat de la planète. On peut ainsi plus facilement comprendre comment fonctionne le climat dans un cycle long.

Commençons par regarder la courbe des températures sur les 800 000 dernières années.



Courbe 1 : Variation de la température au fil des âges (source : forage EPICA dome C, Jouzel et al.)

Cette courbe nous apprend que sur les 800 000 dernières années (bien avant que l'homo sapiens ne se développe à la surface de la Terre), des cycles d'environ 100 000 ans se succédaient.

Le rôle de l'orbite terrestre dans les variations climatiques

Donc tous les 100 000 ans, la Terre connaît un réchauffement climatique naturel.

Or, cette courbe coïncide avec le changement de forme de l'orbite de la Terre autour du soleil.

Comme chacun le sait, la Terre tourne autour du soleil suivant une orbite elliptique.

Mais cette ellipse change de forme avec un cycle principal de 400 000 et des cycles secondaires de 100 000 ans, elle s'aplatit plus ou moins comme on peut le voir sur le schéma suivant.

S'en suit donc une variation d'ensoleillement de la planète, et donc de température.

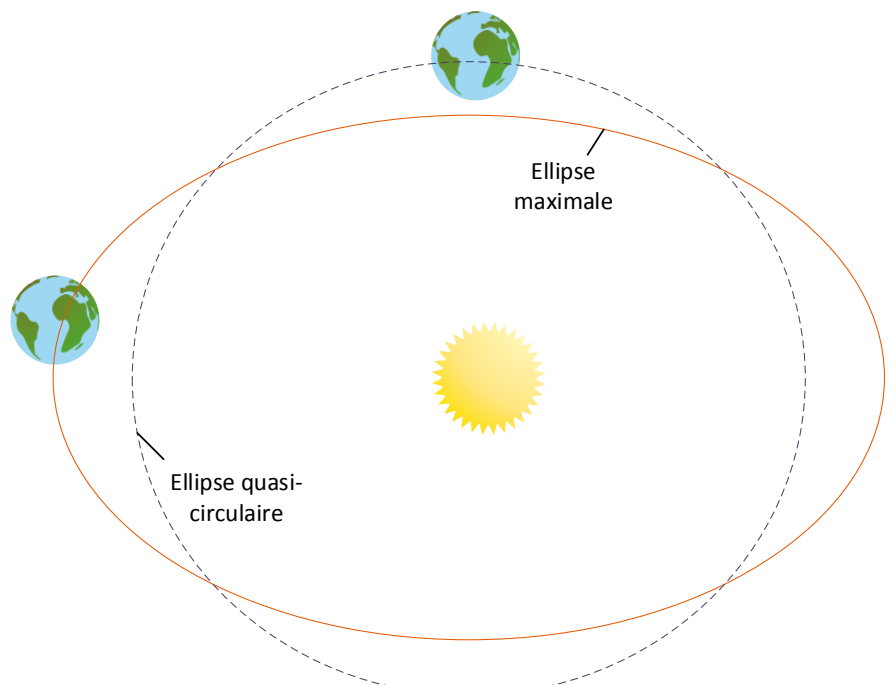
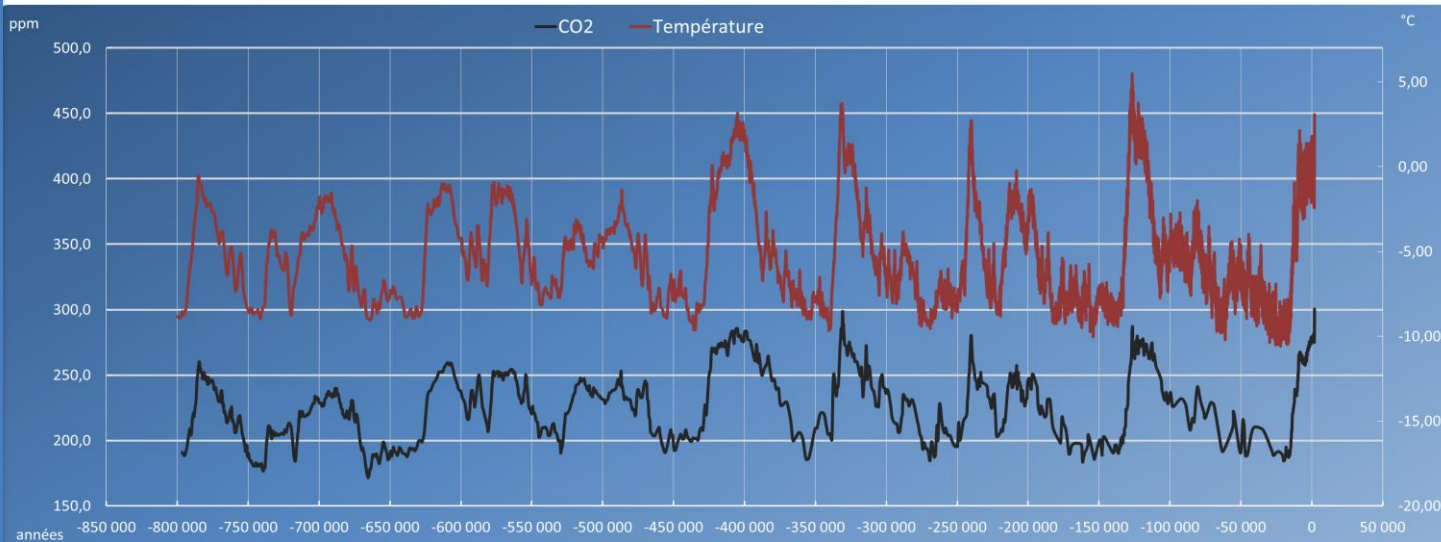


Schéma 4 : Variation de l'excentricité de l'orbite terrestre

Le rôle du CO₂ dans les variations climatiques

Cependant les modèles scientifiques indiquent que la variation de température due au changement de forme de l'orbite terrestre n'est que de 0.5 à 1°C. Or, on voit des variations de plus de 10°C sur la courbe 1. C'est donc qu'il existe un **effet amplificateur**. C'est le CO₂ qui joue ce rôle.

La courbe suivante illustre le lien qui lie le climat et la concentration en CO₂ de l'atmosphère.



Courbe 2 Variation de la température et de la concentration en CO₂ de l'atmosphère au fil des âges (sources : EPICA Dome C, Lüthi, D., et al.)

Quelle mécanique lie le CO₂, l'orbite Terrestre et la température moyenne du globe ?

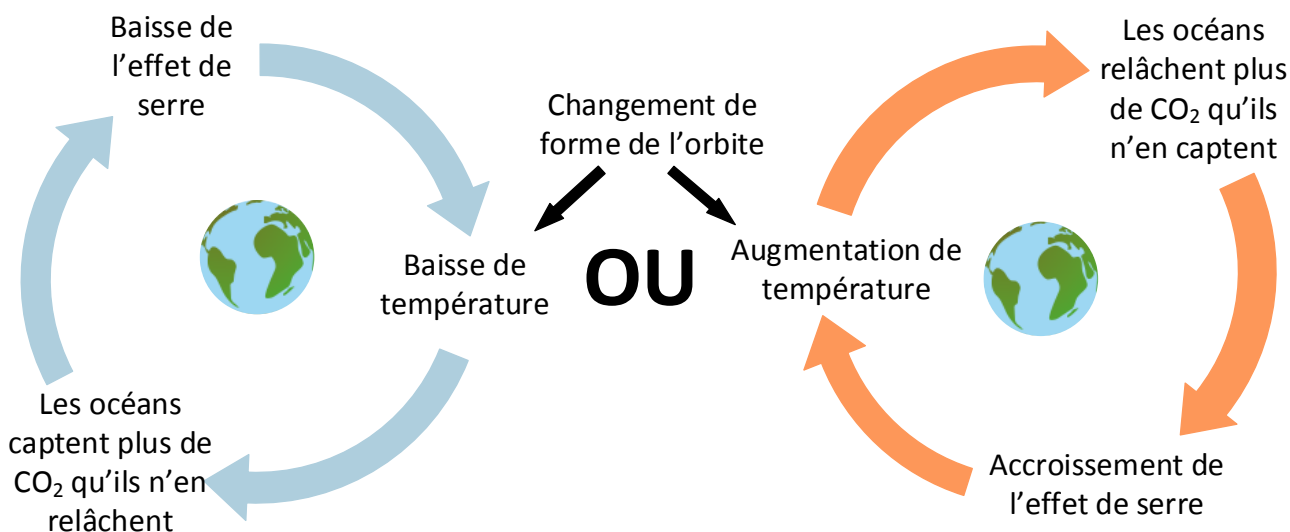
On a vu précédemment que les océans relâchent du CO₂ lorsqu'ils se réchauffent.

Ainsi, le climat commence à varier sous l'effet du changement de forme de l'orbite terrestre. Cette petite variation de température suffit à jouer sur les océans. Lorsque c'est une hausse de température, les océans relâchent plus de CO₂ qu'ils n'en captent.

Ce CO₂, une fois dans l'atmosphère va jouer son rôle d'absorbeur d'infrarouges terrestres, tout en restant transparent aux infrarouges solaires. Il va ensuite réémettre ce surplus d'infrarouges absorbé. La planète se réchauffe alors un peu plus.

Par effet boule de neige, les océans vont relâcher encore plus de CO₂ à mesure que la température monte.

Le phénomène s'inversera lorsque la variation de l'orbite terrestre fera baisser de quelques dixièmes de degrés la température. Et ainsi de suite.



2// L'influence de l'Homme

2.1 Le nouveau cycle du carbone

L'Homme a un rôle important dans le changement climatique car il change l'équilibre établi de façon naturelle.

Il joue notamment sur la concentration carbonique de l'atmosphère.

Pour bien comprendre l'influence humaine, reprenons le Schéma 3 sur le cycle naturel du carbone et ajoutons le facteur anthropique.

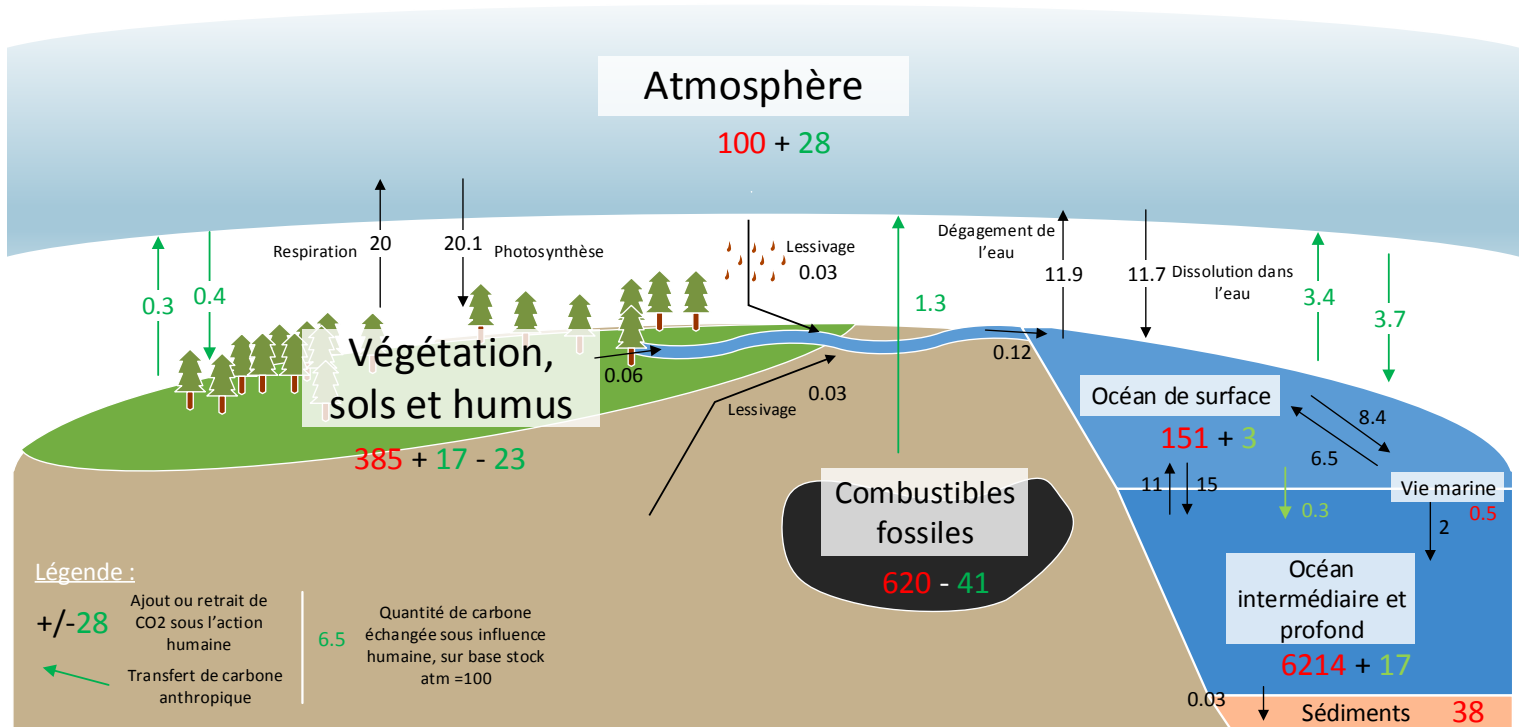


Schéma 5 Cycle du Carbone sous l'influence de l'Homme (source : GIEC volume 4, 2007)

Les valeurs en **rouge** représentent les quantités de carbone contenues dans les stocks.

Les valeurs en **noirs** représentent les échanges entre ces stocks en 1 année.

Ces proportions représentent les stocks de carbone et les échanges naturels tels qu'ils étaient en 1750, donc avant l'ère industrielle.

On a pris pour base que le stock de carbone dans l'atmosphère valait **100** pour simplifier la lecture du schéma (en réalité ce stock représente 597GtC giga tonnes de carbone)

Les flèches et les valeurs **vertes** entre les stocks sont les échanges sous influence humaine en une année.

Expliquons les nouveaux échanges engendrés par l'activité humaine sur ce schéma :

La végétation, les sols et l'humus

Depuis 1750, **17** se sont ajoutés en raison de l'augmentation de **productivité** des plantes, mais **23** sont partis dans l'atmosphère en raison de la **déforestation** et du **changement d'usage des sols** (lorsqu'un sol est retourné pour être exploité, il relâche une partie du CO₂ qu'il contenait)

C'est ainsi **0,3/an** qui partent par an par dû à la déforestation. Néanmoins, l'augmentation de la concentration de l'air en CO₂ augmente le rendement de la **photosynthèse**, l'écosystème continental absorbe ainsi **0,4/an**. C'est ce qu'on appelle un « puits continental ».

Les combustibles fossiles

Les combustibles fossiles, qui, avant 1750 n'échangeaient pratiquement pas avec l'atmosphère, ont perdus 41, et c'est ainsi 1,3/an qui partent alimenter l'effet de serre. Il s'agit notamment de l'utilisation de ces combustibles pour produire de l'énergie, de la chaleur ou de la mobilité.

Les océans

Sous l'effet d'une augmentation de la concentration en carbone de l'atmosphère, les océans captent plus de CO₂ (car la teneur en CO₂ tend à s'équilibrer entre atmosphère et océan). Mais comme nous l'avons vu plus haut, sous l'effet de la montée de température due à l'effet de serre additionnel (lui-même dû à une augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂), les océans relâchent 3,4/an vers l'atmosphère.

Lorsqu'on fait le bilan de ce qui entre et ce qui sort de l'atmosphère, on obtient un flux entrant de 0,9/an soit environ 540 GtC (milliard de tonnes de Carbone)

Pour résumer...

L'homme intervient dans le cycle du carbone, notamment en brûlant des combustibles fossiles.

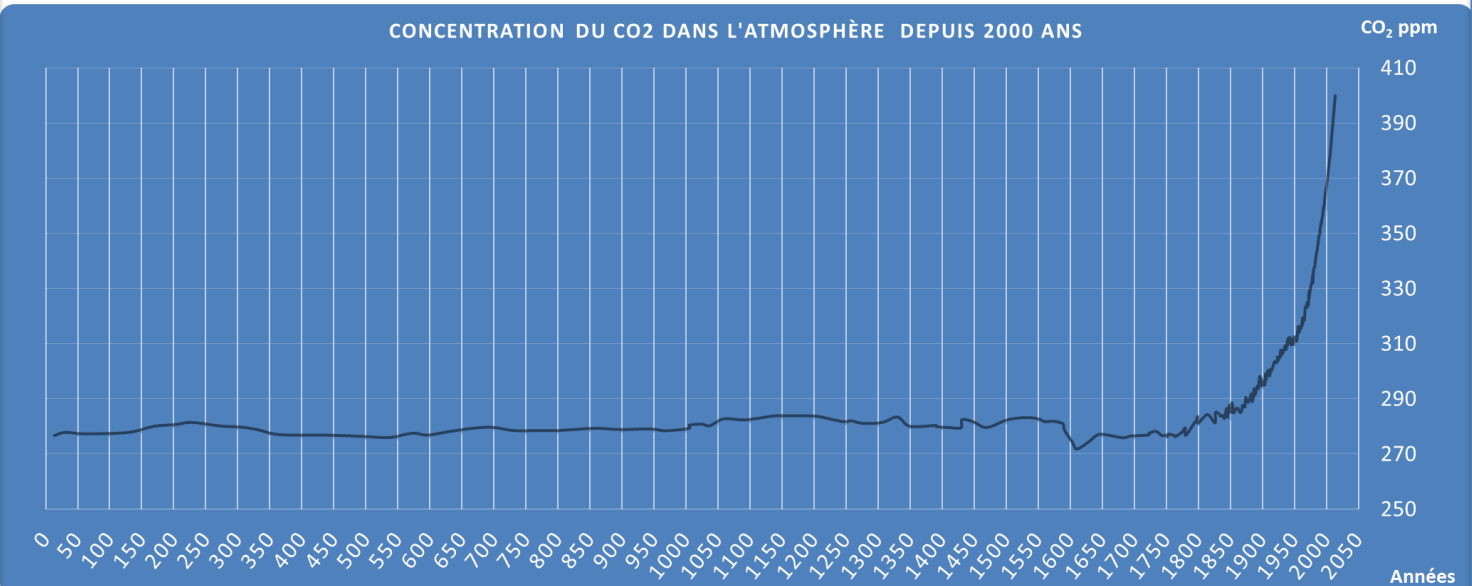
Le CO₂ ainsi dégagé, va augmenter la concentration en CO₂ de l'atmosphère et des océans.

2.2 Une augmentation rapide du CO₂ d'origine humaine

Le nouveau cycle du carbone que nous avons vu au-dessus n'est qu'une « photo » prise à un instant T. Mais ces chiffres évoluent de plus en plus rapidement. Pour preuve : entre 1994 (date des données du schéma 5) et 2014, nous sommes passés d'environ 360 ppm à plus de 400 ppm, soit une hausse dépassant 10%.

La teneur en CO₂ depuis 2000 ans

Pour mettre en évidence le caractère humain du dégagement du CO₂ en excès, remontons sur les 2000 dernières années.



Courbe 3 Concentration en CO₂ dans l'atmosphère depuis 2000 ans (source : Law Dome Etheridge, D.M, et al , 2010)

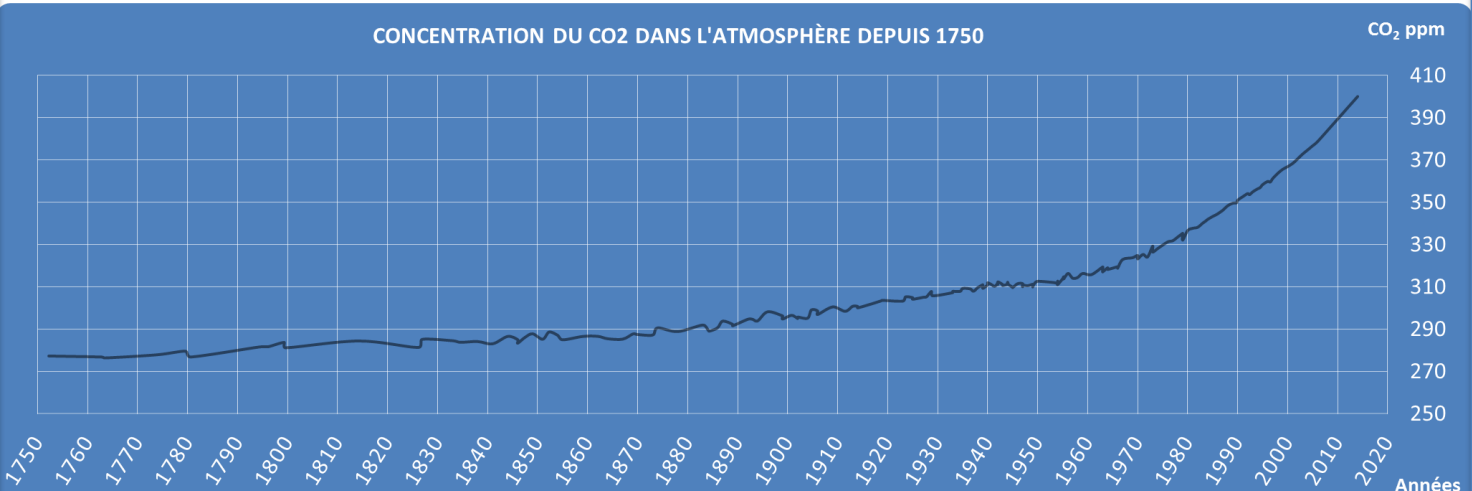
Nous voyons ici une augmentation très importante de la teneur atmosphérique en CO₂ depuis le début de l'ère industrielle. On se met alors à extraire et brûler du charbon puis du pétrole et du gaz en grande quantité.

On est ainsi passé d'environ **280** ppm (parti pour million) en moyenne sur deux millénaires à plus de **400** ppm au début 2014.

Cette augmentation est d'autant plus alarmante que, si on reprend la courbe 2 des 800 000 dernières années vue plus haut, nous sommes déjà dans la partie haute du cycle avant 1750 (le cycle allant de 180 ppm à 280 ppm en moyenne).

La teneur en CO₂ depuis 1750

En zoomant un peu, on voit l'accélération de l'augmentation d'abord aux alentours des années 1860, puis aux alentours des années 1960.



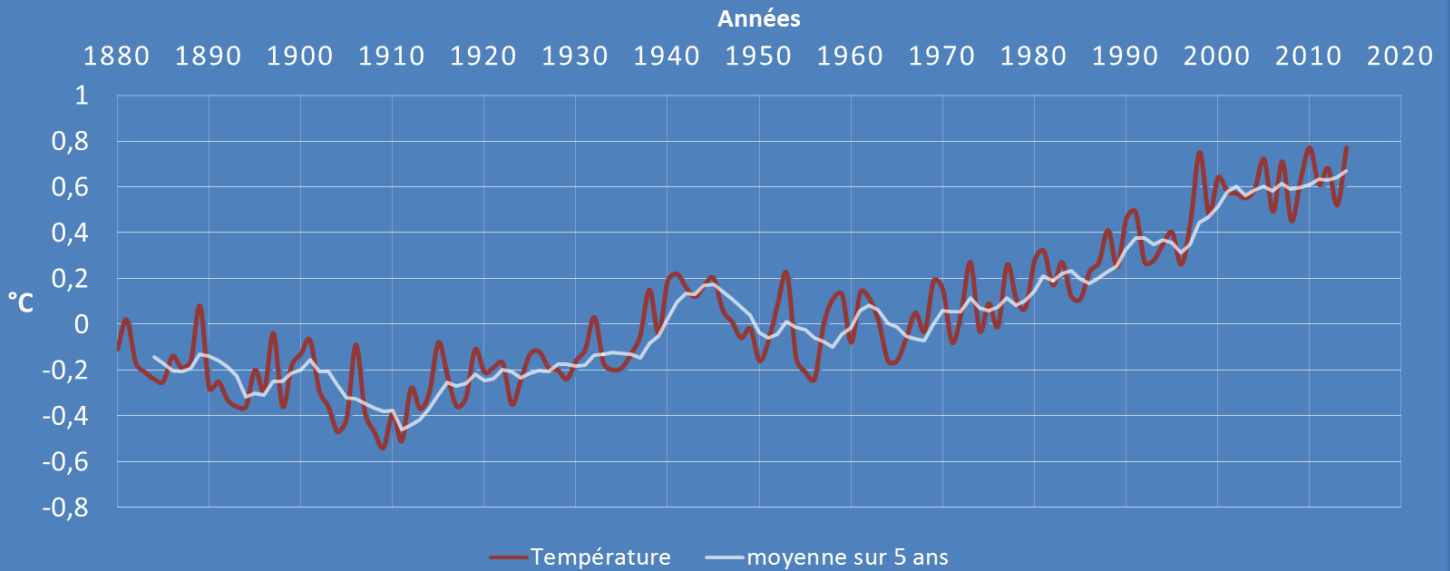
Courbe 4 Concentration en CO₂ dans l'atmosphère depuis 1750 (source : Law Dome Etheridge, D.M, et al , 2010)

2.3 Une augmentation de température rapide

La montée des températures

Enfin, voici la courbe des températures depuis 1880.

VARIATION DE TEMPÉRATURE PAR RAPPORT À LA MOYENNE 1961-AUJOURD'HUI



Courbe 5 Variation de la température de 1880 à aujourd'hui (source : National Oceanic and atmospheric Administration USA)

Le GIEC (Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) relève que la température, même si elle a déjà été plus élevée, **n'a jamais augmenté aussi rapidement.**

Or, la biodiversité et la planète elle-même mettent du temps à trouver de nouveaux équilibres suite à un changement climatique. Mais à la vitesse où vont les choses, tous ces équilibres sont en dangers. C'est pourquoi le simple terme de changement climatique n'est pas suffisant ; nous sommes bien face à un **dérèglement climatique.**

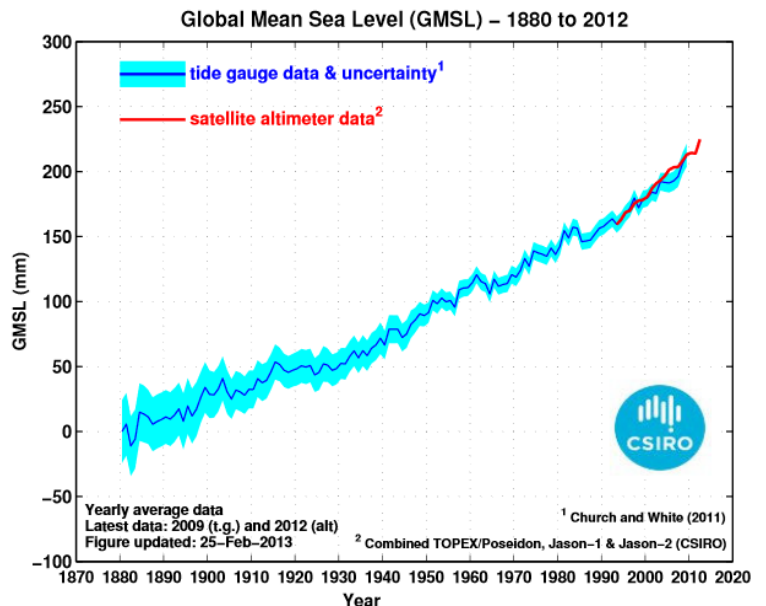
L'augmentation du niveau des eaux

Mais l'augmentation de la température n'est pas la seule conséquence du dérèglement climatique.

La montée du niveau des océans est aussi à prévoir.

En effet on peut voir sur la courbe suivante que le niveau de l'eau monte de façon régulière depuis 1880.

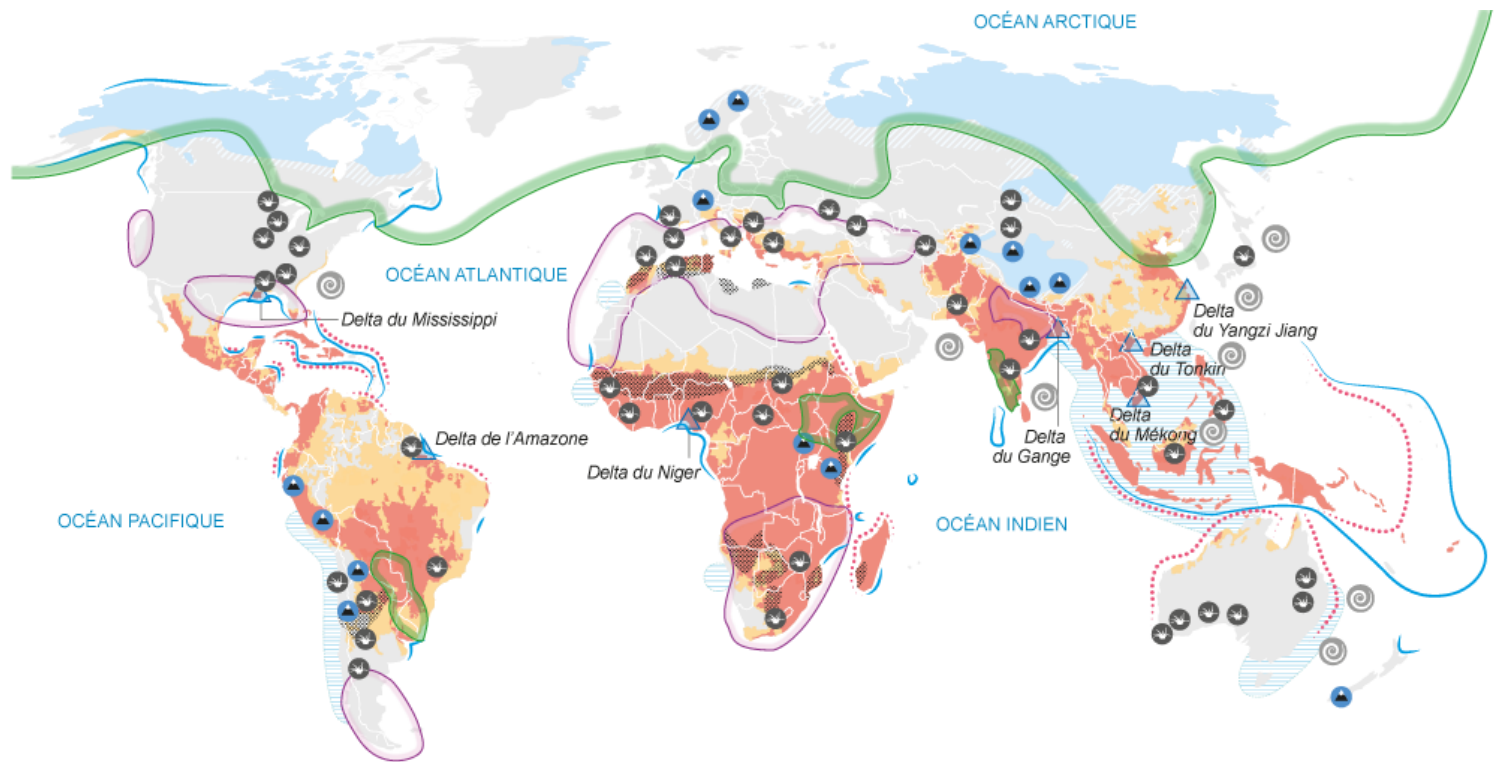
La mécanique qui régit la montée des océans peut s'expliquer grossièrement du fait que l'eau chaude occupe un volume plus grand que l'eau froide ; les océans gonflent donc lorsque la température augmente.



Ainsi les prévisions du GIEC vont d'une montée de **0,3 à 1m** d'ici **2100**, avec des conséquences extrêmes sur les populations et sur la biodiversité.

3 // Les conséquences

Sur la carte suivante réalisée par le journal *Le Monde* en septembre 2013, on voit les différents points vulnérables de la planète face au dérèglement climatique.



Zone de risque lié au changement climatique

Risque extrême*

Risque élevé

Grands deltas menacés

Effets multiples et difficiles à mesurer

Hausse des précipitations

Baisse des précipitations

Désertification

Activité cyclonique accrue

Montée du niveau de la mer

Fonte du pergélisol

Fonte des glaciers

Dégradation des systèmes agricoles

Dégradation des ressources halieutiques

Dégradation des récifs coralliens

*selon l'index "Climate Change Vulnerability"

Compilation Atlas du monde de demain, La Vie/Le Monde

Sources : PNUE ; V. Raison, 2033, Atlas des futurs du monde, Robert Laffont, 2008 ; Maplecroft, Climate Change Vulnerability Index 2013

Les risques liés à une augmentation de température sont nombreux.

-La **montée des eaux**, amplifiée par la fonte du sol gelé (pergélisol) et des glaciers, toucherait tous les continents de façon anarchique et condamnerait même de nombreuses îles.

-Le dérèglement des précipitations entrainerait des épisodes de **sécheresse** concomitamment à des épisodes **d'inondations**. Ainsi de grandes zones se désertifieraient.

-L'activité **cyclonique** pourrait s'accroître.

-La biodiversité souffrirait également ; les **ressources** halieutiques (vie marine) se raréfieraient dans de grandes zones où la vie humaine est très dépendante de la pêche.

Et l'homme dans tout ça ?

On peut difficilement prévoir les conséquences sur la vie humaine et l'organisation des sociétés actuelles. Mais on peut aisément imaginer qu'avec de tels événements, les **tensions** entre peuples se partageant une ressource plus rare s'accroîtront, les populations les plus directement touchées **migreront** vers les zones moins touchées.