

THEME 2 : Enjeux Planétaires contemporains

Atmosphère, Hydrosphère, climats : du passé à l'avenir

Classe : Terminales S SPECIALITE
Durée conseillée : 7 semaines
Nombre de TP :

En rouge : les objectifs
En bleu : les activités pratiques
En vert : problématiques et objectifs

Introduction (documents)

L'étude statistique du XXème siècle montre que la population mondiale a été multipliée par 7 entre 1945 et 2010. Ce coefficient est également retrouvé pour la consommation énergétique mondiale, basée à 75% sur des énergies non renouvelables mais également pour la production agricole. Cette dernière stagne à 70 Q/ha, ce qui montre que les ressources sont limitées (capacité de régénération du sol, diminution de la biodiversité, aléa climatique ...).

En parallèle, le taux de CO₂ est passé de 288ppm à 390 ppm de 1945 à 2010 soit 135% d'augmentation. Le débat est partagé entre les scientifiques mais de nombreuses équipes de recherche montrent de façon de plus en plus précise la part de l'Homme dans les modifications récentes du climat.

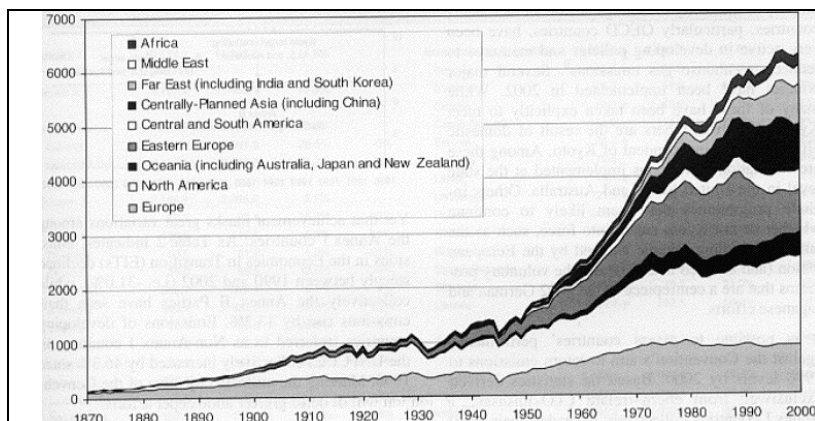
Problématique : Quels sont les changements récents du climat et quelle est la part de l'Homme dans ces changements ?

Pour répondre à cette question, nous allons commencer par dresser un bilan des changements depuis 150 ans. Puis nous verrons les variations climatiques plus anciennes pour comprendre comment le climat a changé avant la présence de l'Homme. Ceci permettra d'identifier les facteurs à l'origine des changements climatiques pour envisager la part de l'impact anthropique. Enfin, nous verrons quels sont les scénarios envisageables pour les climats du futur.

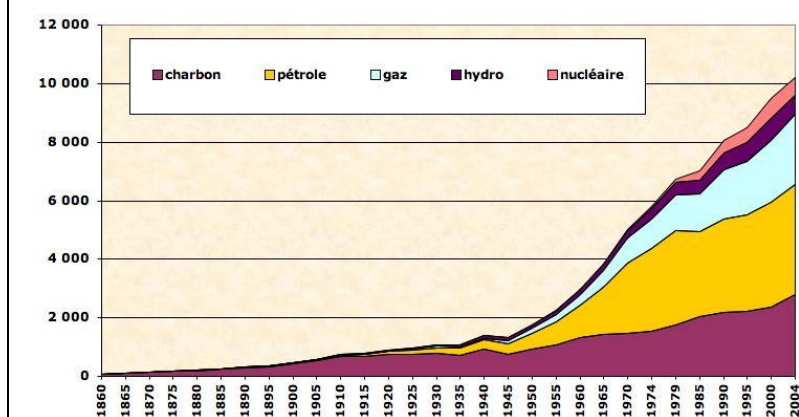
Objectifs de cette partie:

- Construire des modèles climatiques
- Identifier la part de responsabilité de l'homme dans les changements climatiques
- Comprendre la complexité des modèles climatiques
- Comprendre ce qu'est l'effet de serre et le cycle du carbone
- Connaître les principaux outils d'étude des climats récents (glaces, pollens ...)
- Connaître les principaux outils d'étude des climats anciens (sédiments et paléontologie)
- Envisager les climats futurs et la part de responsabilité de l'homme

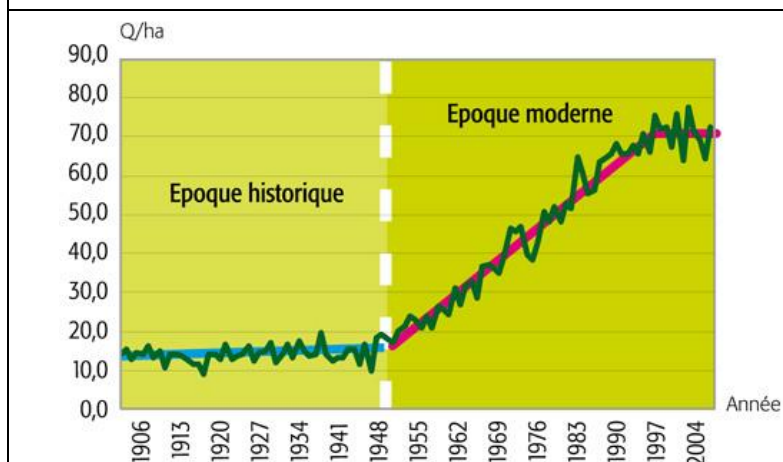
Document : Etat des lieux de l'ère industrielle



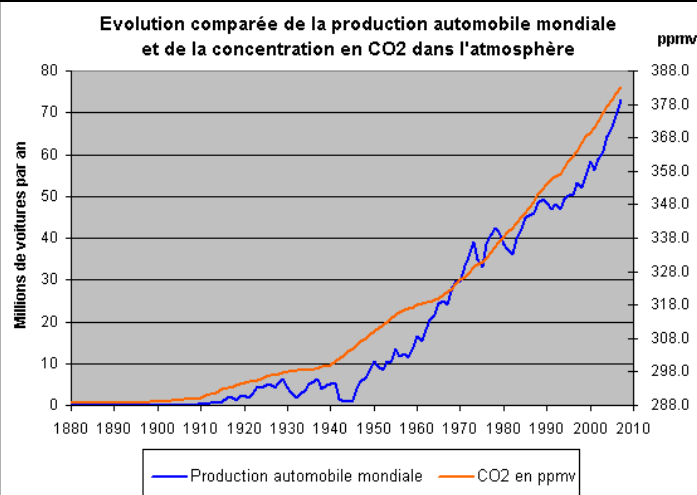
Graphique de la population mondiale (en millions d'habitants) depuis 1870



Graphique de la consommation d'énergie (en GTep : Giga Tonne équivalent pétrole) depuis 1860



Etat de la production agricole mondiale (en quintal : 100 kg par hectare) depuis 1906



Evolution comparée de la production automobile mondiale et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère

Chapitre 1

Le climat actuel et l'impact de l'Homme via l'effet de serre

Climat : "série des états de l'atmosphère au-dessus d'un lieu, dans leur succession habituelle".

TP1 – L'effet de serre et la part de l'Homme dans le réchauffement climatique

Problématique :

- Quelle est la part de l'Homme dans le réchauffement climatique ?
- Qu'est-ce que l'effet de serre et son rôle sur Terre ?

Objectifs :

- Connaître le climat du Quaternaire
- Connaître les outils pour déterminer le climat

En 2012, la moitié des phénomènes météorologiques extrêmes a été provoquée par le réchauffement résultant des émissions de gaz à effet de serre, produites par les activités humaines, selon un rapport effectué par 18 équipes scientifiques.

I- L'état des lieux des modifications climatiques récentes

1. Quelques valeurs chiffrées

Depuis les années 1880 (premières années de mesure précises des paramètres météorologiques), on note un réchauffement climatique caractérisé par :

- Une augmentation des températures de 0,8°C
- Une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 17 cm
- Une fonte des glaces arctiques importante (surface des glaces divisées par 2 entre 1979 et 2010)

2. Un lien avec l'Homme

Dans le même temps, on constate :

- Une augmentation du taux de CO₂ (288 à 395 ppm : soit 135% d'augmentation). Cette augmentation est corrélée à la consommation des énergies fossiles qui connaît une accentuation depuis les années 1950.
- Ainsi, l'évolution du taux de CO₂ actuel semble imputée aux Hommes. Comment déterminer la part de l'Homme dans ces modifications ?

II- Le cycle du carbone et le CO₂, gaz à effet de serre

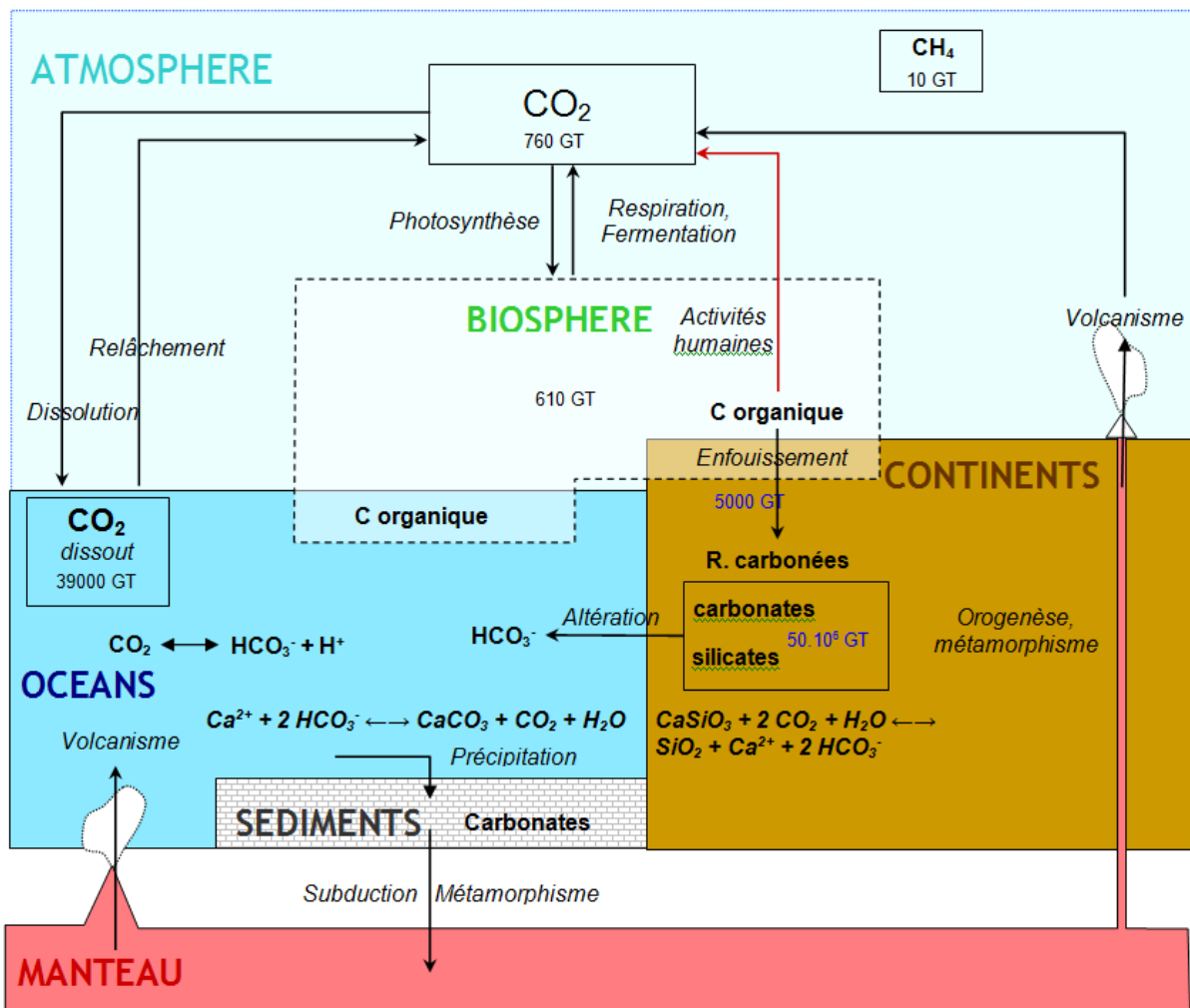
1. L'évolution du taux de CO₂ et le cycle du carbone

Le taux de CO₂ de l'atmosphère est régulé par de nombreux échanges entre les réservoirs terrestres (Atmosphère, Hydrosphère, Biosphère, Lithosphère et Manteau). Ainsi, le CO₂ est rapidement échangé entre Atmosphère et Biosphère mais également entre Atmosphère et Hydrosphère (océans). A plus long terme, du CO₂ est incorporé dans la lithosphère (formation des sédiments carbonatés et des roches carbonées telles que le pétrole ou le charbon).

Cet équilibre est actuellement déplacé par les activités humaines :

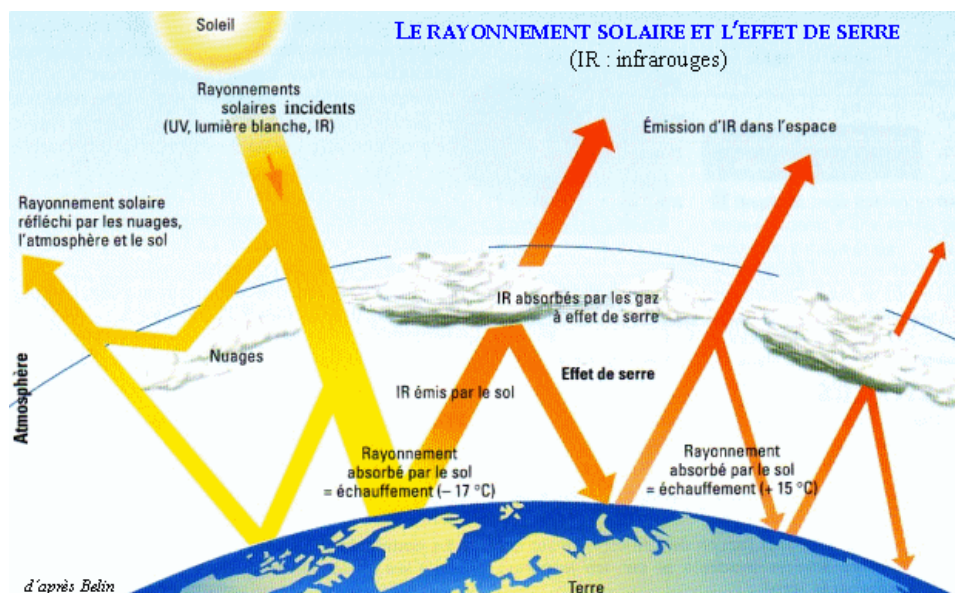
- L'utilisation des énergies fossiles libère très rapidement du carbone dans l'atmosphère (alors que la formation de ces roches carbonées prend des millions d'années)
- La déforestation produit de grandes quantités de CO₂ qui ne sont pas compensées par des cultures (affaiblissement de la photosynthèse au cours du temps).

Chaque année, l'Homme produit 7 à 8 Gt de CO₂ qui sont renvoyées dans l'atmosphère (soit 1% d'augmentation) et déséquilibre le cycle du carbone.



2. Le CO₂ et l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel lié à la présence, dans l'atmosphère, de gaz tels que le CO_2 , le CH_4 (méthane), le N_2O (protoxyde d'azote) et l'eau sous forme de vapeur. Ces gaz permettent de piéger les infra-rouges émis par le Soleil, ce qui augmente la température de l'atmosphère. Ce phénomène est normalement à l'équilibre : toute l'énergie qui est reçue est renvoyée. Ainsi, il n'y a pas d'augmentation de température indéfinie. Mais depuis 50 ans, le taux de CO_2 augmente fortement et accentue la chaleur échangée avec la surface terrestre.



3. Vers une amplification du réchauffement ?

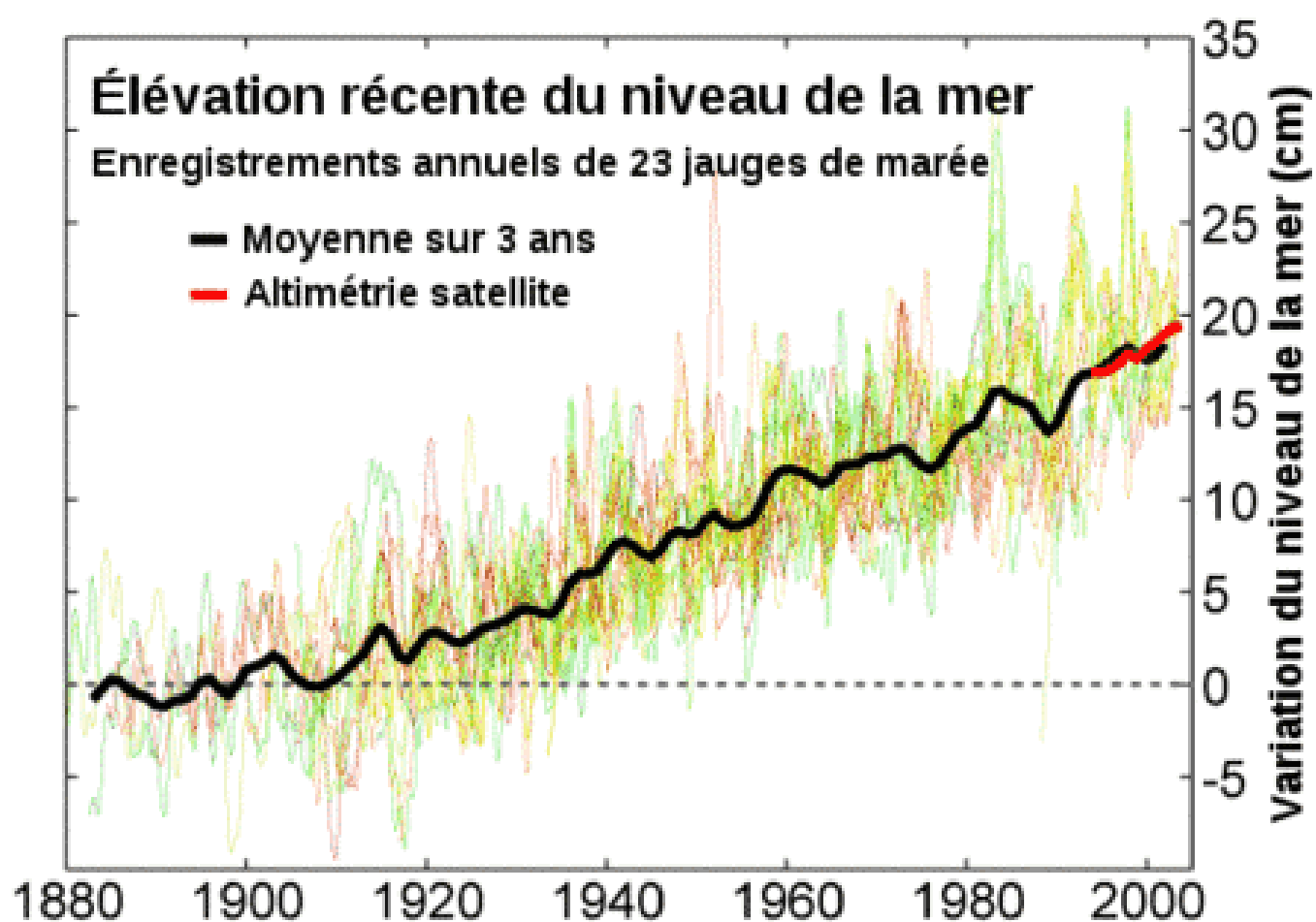
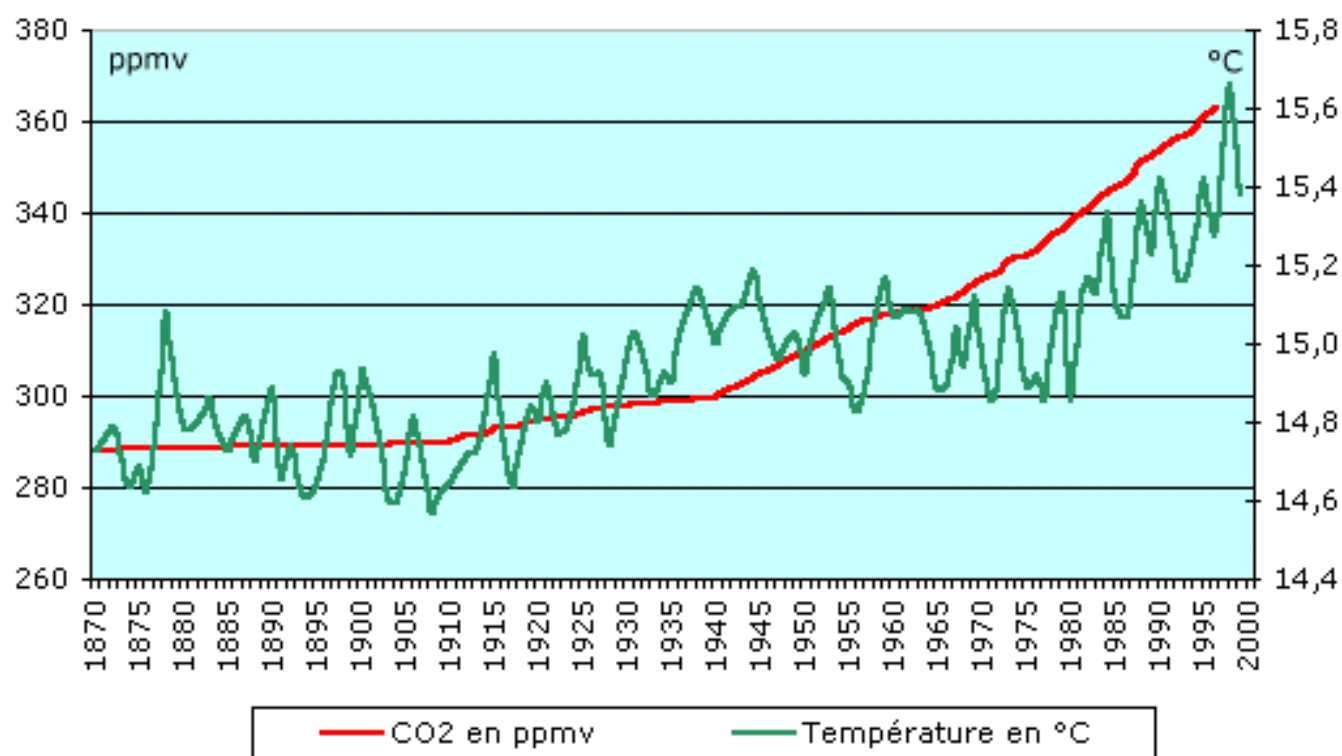
L'équilibre établi est probablement fragile. La connaissance du cycle du carbone montre plusieurs phénomènes qui pourraient accentuer le réchauffement climatique : ce sont les phénomènes de renforcement (ou d'amplification). Par exemple :

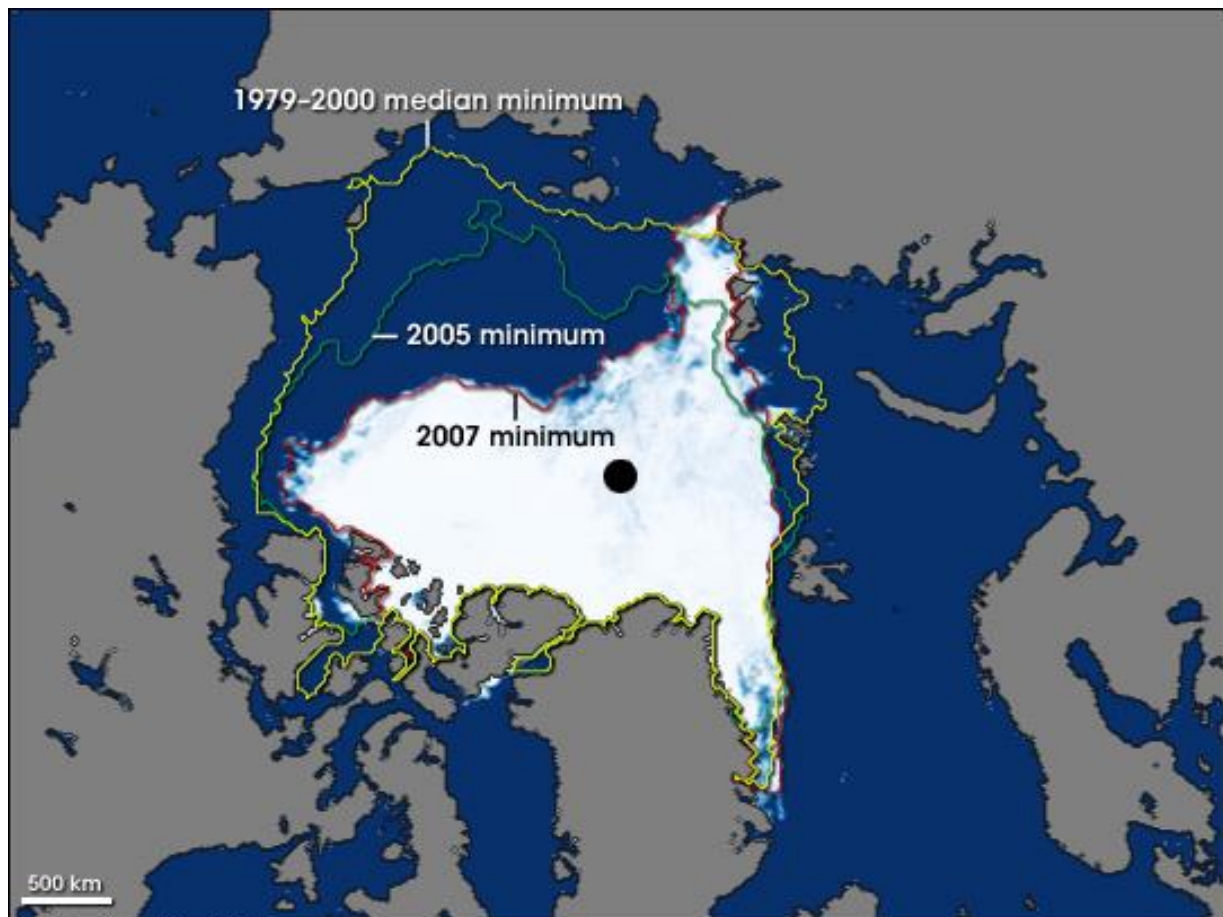
- Quand la température de l'eau augmente, la solubilité du dioxyde de carbone diminue.
- Cela entraîne la diffusion du dioxyde de carbone océanique vers l'atmosphère.
- L'augmentation de l'effet de serre qui en résulte amplifie le phénomène de réchauffement qui à son tour entraîne le relargage du CO₂ océanique.

Néanmoins, il est difficile de prévoir avec certitude les modifications climatiques à long terme.

CONCLUSION :

Le climat varie de façon importante depuis 1850. Ces variations sont associées aux variations d'origine humaine (démographie, consommation d'énergie fossile, taux de GES dans l'atmosphère). On en déduit que le réchauffement observé est très probablement dû à l'Homme. L'étude des climats antérieurs peut nous permettre de déterminer si ces variations présentent également une part indépendante de l'Homme et nous permettrait d'envisager l'évolution future du climat.



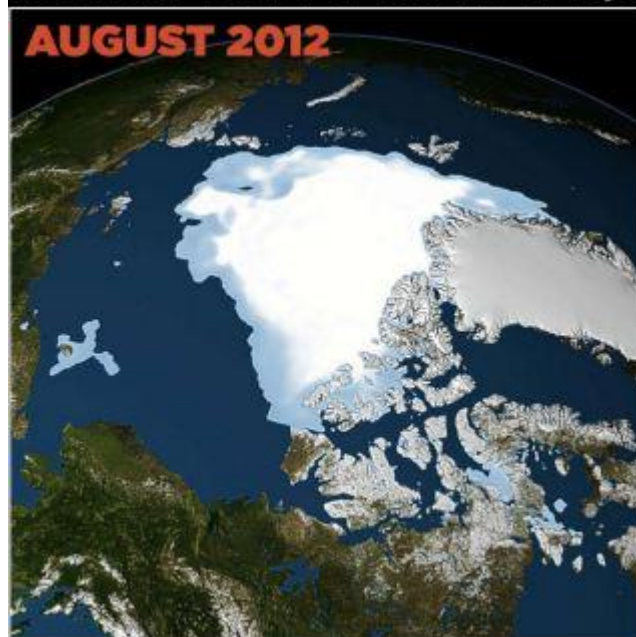


September 16, 2007

Sea Ice Concentration (percent)



HOW ICE SHEET GREW 920,000 SQUARE MILES IN A YEAR



AUGUST 2012

CONTRACTION: This Nasa satellite image shows the ice at the smallest extent on record, with much of the Arctic Ocean uncovered



AUGUST 2013

RECOVERY: Contrary to predictions that the ice would have vanished by this summer, it has actually increased by 60 per cent from last year

Chapitre 2

La reconstitution des modifications climatiques récentes (depuis 800 000 ans)

I- Les indices de l'évolution des climats récents

TP2 – L'apport de la glaciologie

Objectifs :

- Connaître le climat du Quaternaire
- Connaître les outils pour déterminer le climat
- Construire un modèle climatique pour identifier la part de l'Homme dans les changements actuels.

1. Les calottes polaires, des archives chronologiques ordonnées des climats passés

A L'accumulation des couches de glace : des archives bien classées.



La neige est un assemblage très aéré de cristaux de glace. En s'accumulant, cette neige se tasse peu à peu sous l'effet de son propre poids. En l'espace de quelques mois, les cristaux se transforment en fins granules qui finissent par se souder pour former de la glace compacte. Dans les régions polaires ou dans la zone des neiges éternelles des chaînes de montagnes, la neige va donc, année après année, constituer des couches successives de glaces.

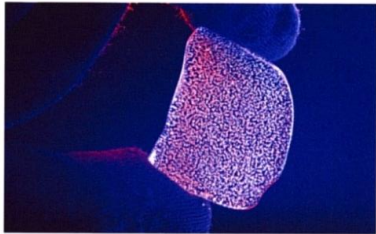
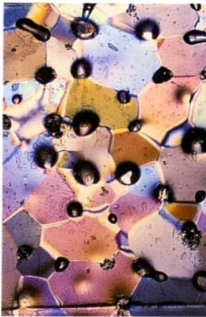
Depuis plusieurs décennies, des forages ont été réalisés dans les calottes polaires et les glaciers de montagne. Le carottage le plus profond a été réalisé en plein cœur de l'Antarctique (site de Vostok) par des chercheurs franco-russes qui ont atteint une profondeur de plus de 3,5 km. Ils ont ainsi pu accéder à des couches de glace vieilles de près de 420 000 ans.

Ce forage a exigé vingt ans d'efforts, par des températures variant entre -60 et -40 °C. Il a été interrompu en 1998, afin d'éviter la contamination d'un immense lac sous-glaciaire (trois fois le lac Léman !), situé 120 m plus bas et qui serait susceptible de contenir des formes inconnues de vie.



1 Comme les feuilles d'un éphéméride, chaque couche de glace correspond à une date précise.

2 Des bulles d'air sont fossilisées dans la glace.

Photographies :
a - observation à l'œil nu.
b - observation au microscope en lumière polarisée. Les « bulles » notées sont des bulles d'air emprisonnées dans la glace.

Chaque année, une couche de glace se forme aux Pôles. La neige accumulée se compacte (2 cm d'épaisseur). On peut alors appliquer le principe de superposition ; les glaces les plus profondes sont les plus anciennes. On a donc des archives ordonnées.

La glace piège ainsi des bulles de l'air présent à la période où la neige est tombée et s'est accumulée. Ces bulles contiennent des informations sur la teneur en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et H₂O vapeur) de l'atmosphère à l'échelle de la planète et donnent donc des informations sur la température ou le climat de l'époque.

Ces gaz permettent de reconstituer le climat depuis 400 000 ans environ. Celui-ci se compose de cycles glaciaires constitués :

- D'une phase glaciaire (80 000 ans) avec un faible taux de GES (FROID)
- D'une phase interglaciaire (10 000 ans) avec un fort taux de GES (CHAUD).

2. L'utilisation des isotopes présents dans les glaces.

A

X

Z

X : Symbole de l'atome (H, He, C, N, O ...)

Z : Nombre de charge (électrons ou protons)

A : Nombre de masses (protons + neutrons = nucléons)

Définition de l'atome.

Atome : c'est un élément chimique défini par son nombre de charge (Z).

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

Ex: ^{16}O : isotope de l'oxygène comprenant 16 nucléons (8P + 8N)

^{18}O : isotope de l'oxygène comprenant 18 nucléons (8P + 10N)

Activité 2 : le $\delta^{18}\text{O}$.

• $\delta^{18}\text{O}$: grandeur définie par les spécialistes qui comparent le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la glace à un rapport de référence, le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ moyen des océans.

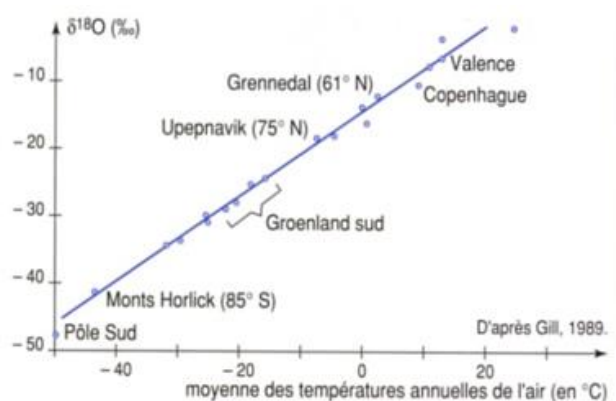
$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ de l'eau de la glace} - \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ moyen des océans} \right)}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ moyen des océans} \right)}$$

Exprimé en ‰, il varie dans le même sens que le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

$\delta^{18}\text{O}$: Grandeur définie par les spécialistes comme le rapport entre le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ d'un échantillon et le $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ d'un standard (l'eau des océans). SMOW (Standard Mean Ocean Water).

L'élément oxygène existe sous deux formes isotopiques : ^{16}O et ^{18}O . L'eau est donc un mélange de molécules H_2^{16}O (99,8 %) et de molécules H_2^{18}O (0,2 %).

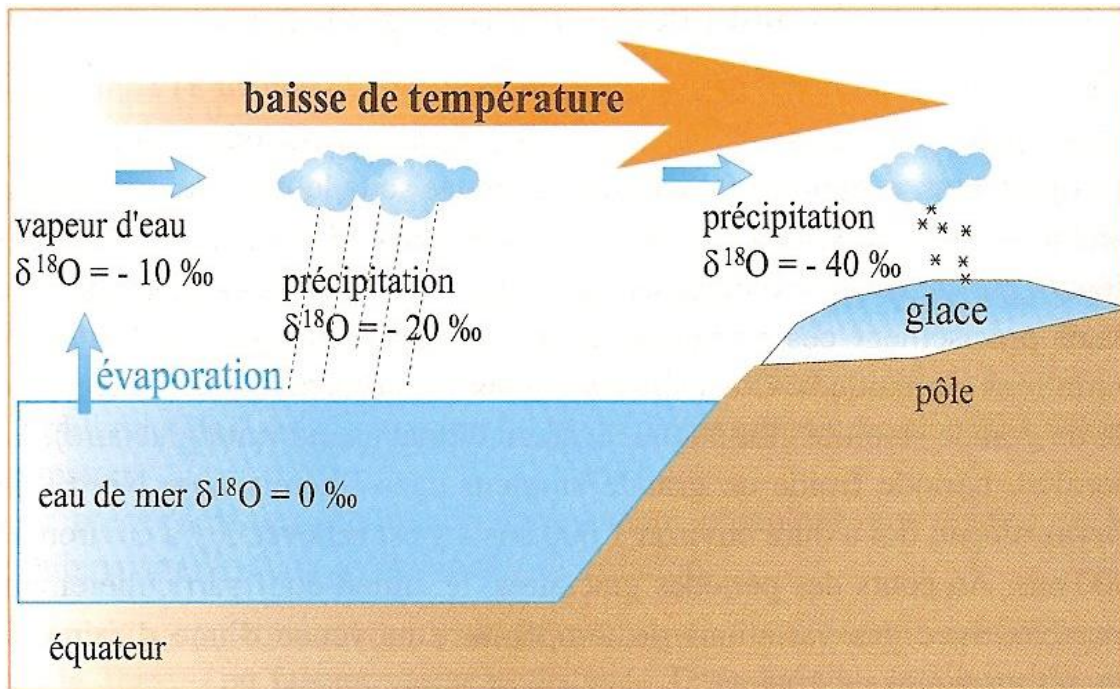
On a constaté que le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans les chutes de neige actuelles (ou plus exactement le $\delta^{18}\text{O}$) dépend de la température atmosphérique au moment de la chute (voir graphique). Tout laisse penser que cette corrélation était la même dans le passé; on peut donc considérer que ce $\delta^{18}\text{O}$ est un bon « paléothermomètre ». Il suffit donc de mesurer le $\delta^{18}\text{O}$ dans une glace ancienne pour en déduire la température qui régnait à l'époque de formation de cette glace.



Le document 2 présente le $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de la température. On observe que plus la température est élevée, plus le $\delta^{18}\text{O}$ est fort. Donc, en connaissant le $\delta^{18}\text{O}$ et en appliquant le principe d'actualisme, on peut déterminer la température de l'atmosphère de l'époque. Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces varie en fonction de la température du climat.

Comment expliquer le lien entre la température et le $\delta^{18}\text{O}$?

Logiciel : OXYGENE pour la modélisation et l'explication du fractionnement isotopique.



Document 1. Principe de l'enregistrement des températures dans les glaces. La proportion de ^{18}O dans les différentes couches est appréciée par un paramètre nommé $\delta^{18}\text{O}$. Par définition, le $\delta^{18}\text{O}$ moyen de l'eau de mer est nul. Plus le $\delta^{18}\text{O}$ d'une précipitation est bas, plus la température de condensation a été basse.

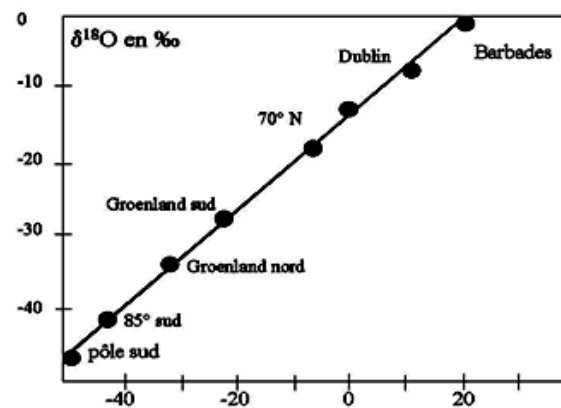
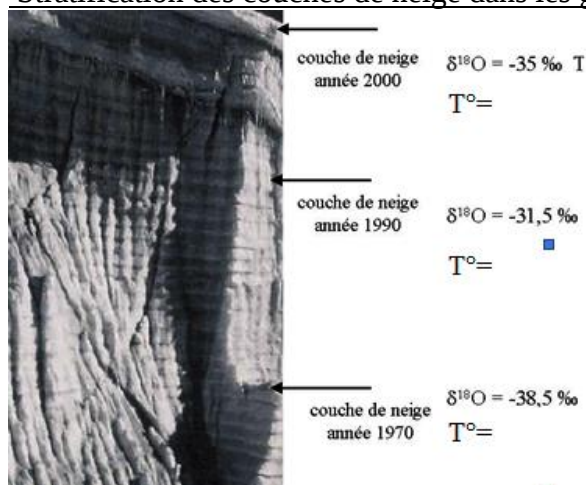
Ceci est expliqué par le phénomène de **FRACTIONNEMENT ISOTOPIQUE** :

- L'évaporation de l'eau de mer accumule de l'eau sous forme isotopique ^{16}O .
- Lors de la condensation de l'eau, les atomes de ^{18}O se retrouvent préférentiellement dans la phase liquide.
- La vapeur d'eau résiduelle s'appauvrit ainsi en ^{18}O depuis les zones équatoriales jusqu'aux pôles.
- Plus la température est basse, plus la neige est appauvrie en ^{18}O et donc plus le rapport $\delta^{18}\text{O}$ des glaces diminue.

CONCLUSION :

La mesure du $\delta^{18}\text{O}$ des glaces anciennes permet d'évaluer localement la température au moment de la chute de neige. Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces est un **PALEOTHERMOMETRE DIRECT**. Ce paramètre permet donc de reconstituer les climats passés (depuis 400 000 ans) et les résultats obtenus sont totalement cohérents avec ceux obtenus pour les taux de GES (montrant les mêmes cycles glaciaires).

Stratification des couches de neige dans les glaciers des Andes



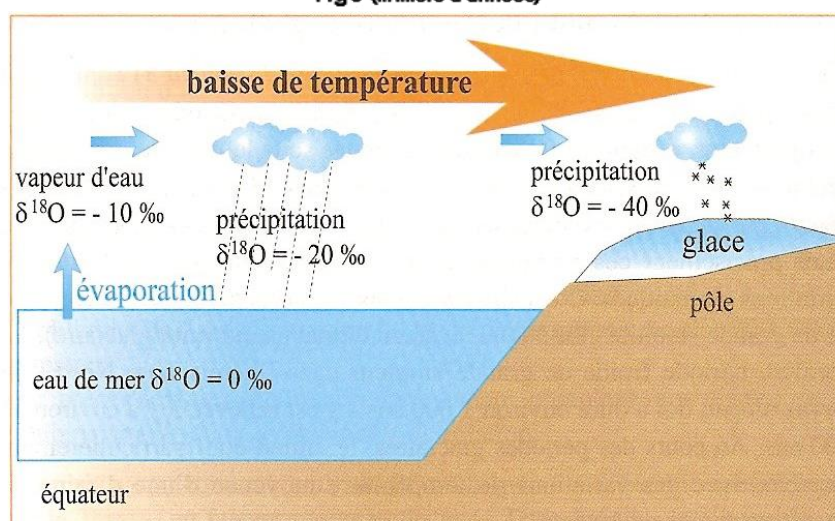
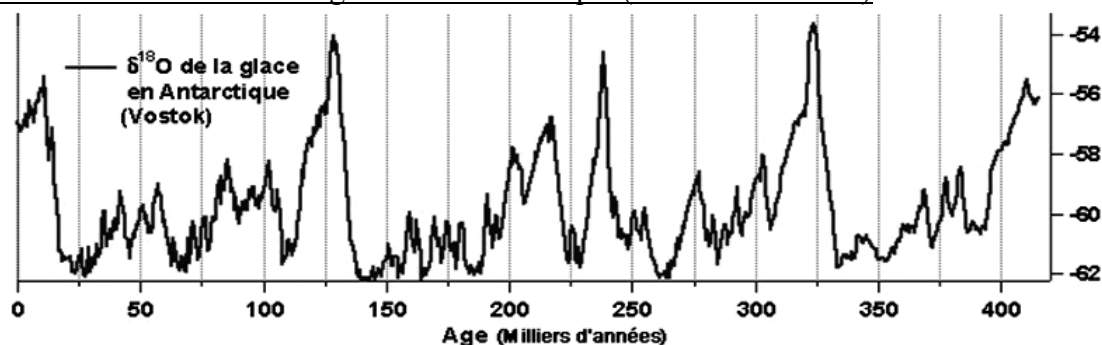
Graphiques des variations **actuelles** de la composition isotopique de l'oxygène des précipitations de différentes localités en fonction de la moyenne des températures annuelles de l'air. La pente de cette droite est de $0,7\text{‰} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Définition du $\delta^{18}\text{O}$ (Delta¹⁸O) et du SMOW

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}} \right] \times 10^3$$

SMOW=Standard Mean Ocean Water)
 La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer actuelle vaut 0‰
 La valeur moyenne du rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) de l'eau de mer actuelle est de 2.10^{-3} . La mesure de ce rapport dans la neige d'une station au Groenland où la température moyenne sur l'année est de -30°C donne $(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})=1.93$

Delta¹⁸O dans les carottes de glace de l'Antarctique (Station de Vostok)



Document 1. Principe de l'enregistrement des températures dans les glaces. La proportion de ^{18}O dans les différentes couches est appréciée par un paramètre nommé $\delta^{18}\text{O}$. Par définition, le $\delta^{18}\text{O}$ moyen de l'eau de mer est nul. Plus le $\delta^{18}\text{O}$ d'une précipitation est bas, plus la température de condensation a été basse.

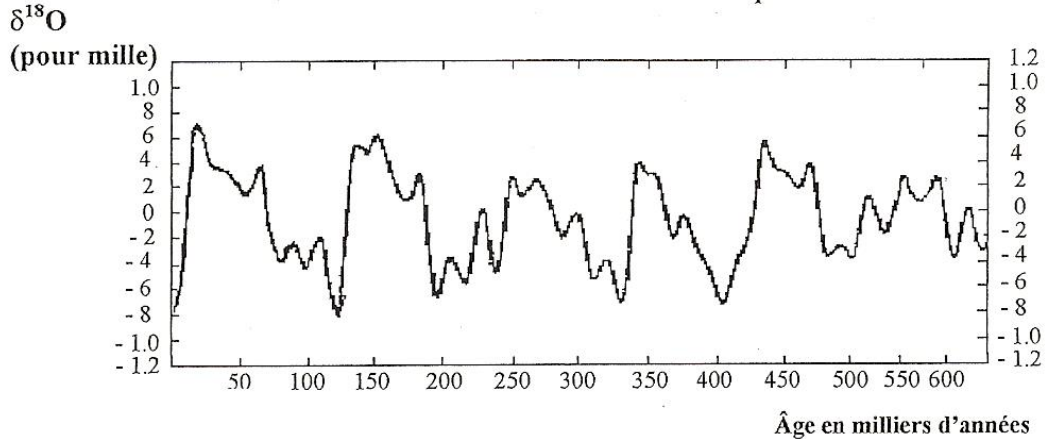
3. L'utilisation des isotopes présents dans les sédiments marins.

DM ? : l'utilisation des isotopes de coquilles d'animaux marins

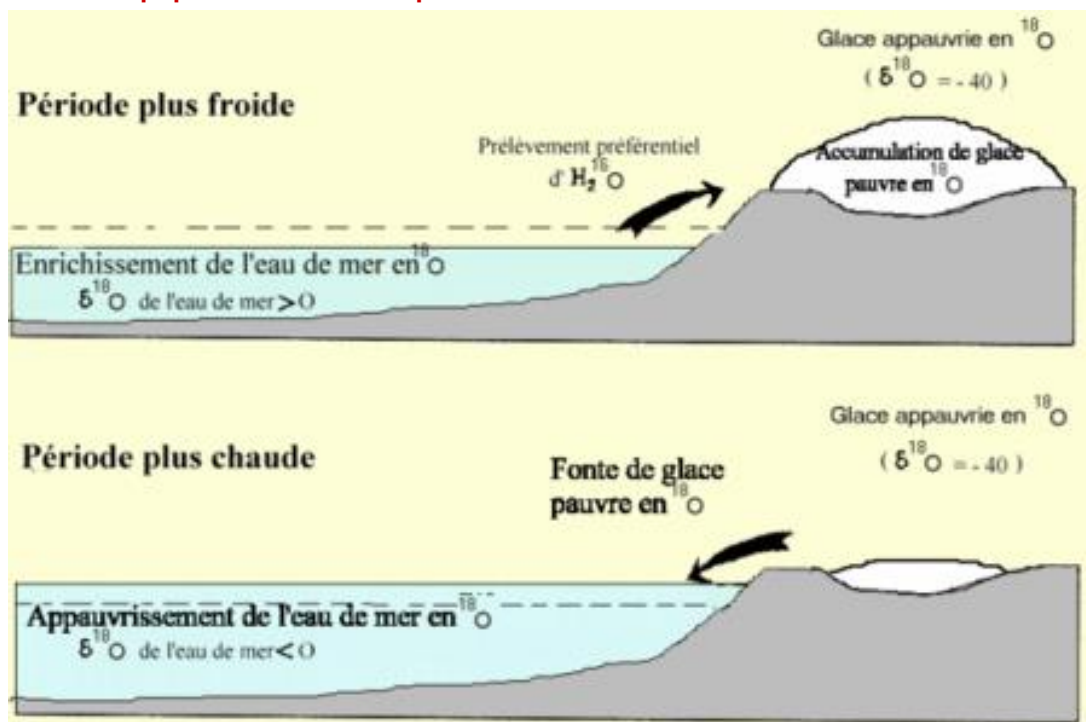
Foraminifères : animaux unicellulaires marins

Test calcaire : coquille de certains animaux invertébrés (foraminifères, oursins ...) constituée de carbonate de calcium ($\text{CaC}^{18/16}\text{O}_3$) et synthétisée à partir de leur environnement (eau de mer).

Document 1 : $\delta^{18}\text{O}$ moyen des sédiments carbonatés marins profonds



Les foraminifères fabriquent leurs tests à partir des éléments chimiques de l'eau. Leur composition isotopique est donc identique à celle de l'eau de mer.



Dans ce cas, l'effet de fractionnement isotopique est inverse à celui des précipitations (pluie et neige).

- En période froide, il y a accumulation de glace appauvrie en ^{18}O et donc enrichissement de l'eau de mer.

- En période plus chaude, il y a fonte de glace pauvre en ^{18}O et donc appauvrissement de l'eau de mer.

- La mesure du $\delta^{18}\text{O}$ des tests de foraminifères constitue donc un **PALEOTHERMOMETRE INVERSE**. Ce paramètre permet aussi d'estimer le volume des glaces polaires.

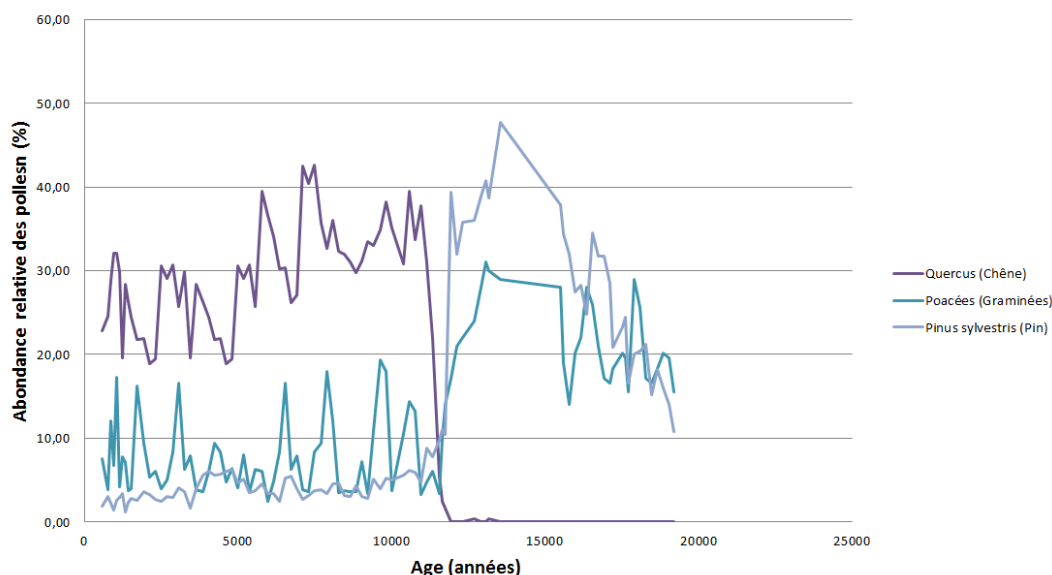
4. L'utilisation des sédiments lacustres et des tourbières

TP3 Palynologie (Epreuve de TP BAC 2005, 2006 et 2007, 2010, 2011)

L'étude des pollens d'un sédiment permet de reconstituer les peuplements végétaux de l'époque. L'association des diverses espèces végétales d'un environnement est étroitement liée au climat. Les préférences climatiques (et/ou exigences écologiques) des associations végétales donnent des indications de température et d'hygrométrie (humidité) des climats.

Ces associations végétales sont déterminées par l'analyse des carottes de tourbe et la réalisation de diagramme polliniques.

Diagramme pollinique de la tourbière de Chambedaze (Auvergne)



HORS PROGRAMME ?

Lors des périodes froides, la végétation se raréfie et les précipitations ravinent les sols. Il y a alors accumulation de particules détritiques formant la tourbe. Les précipitations font augmenter le niveau des lacs (= TRANSGRESSION). Le froid limite également la précipitation des carbonates.

Lors des périodes chaudes, le lac s'évapore et son niveau baisse (= REGRESSION). Les fortes températures accélèrent la précipitation des carbonates et limite l'accumulation de matière organique (moins de tourbe).

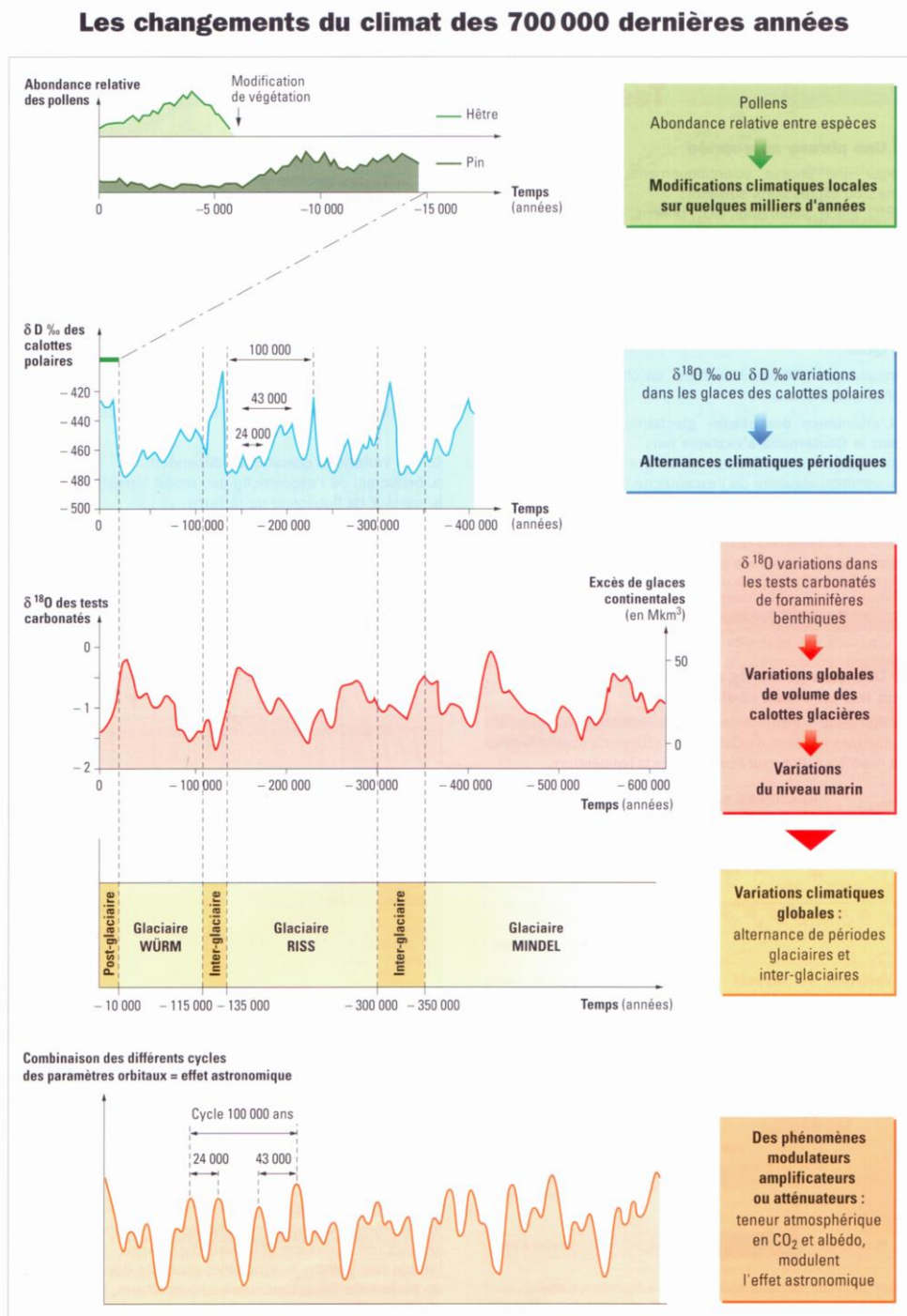
BILAN :

Archives	Outils	Corrélations	Résultats
Datation absolue	Isotopes (ex : ^{14}C)	Période de désintégration et datation	Datation précise
Glaces	$\delta^{18}\text{O}$ et δD	$\uparrow \delta^{18}\text{O} > \uparrow T^{\circ}\text{C}$ PALEOTHERMOMETRE	Températures précises
Bulles d'air	Gaz à effet de serre (GES) (ex : CO_2 , CH_4)	$\uparrow \text{GES} > \uparrow T^{\circ}\text{C}$	Estimation de températures
Foraminifères	$\delta^{18}\text{O}$ et δD	$\uparrow \delta^{18}\text{O} > \downarrow T^{\circ}\text{C}$ PALEOTHERMOMETRE INVERSE	Températures Précises Eustatisme global
Sédiments lacustres	Tourbe $\rightarrow$ Craie	Transgression $\rightarrow$ Régression	Eustatisme régional
Pollens	Caduques $\rightarrow$ Graminées	Fortes $T^{\circ}\text{C} \rightarrow$ Faibles $T^{\circ}\text{C}$	Température et hygrométrie / pluviométrie

II- L'histoire du climat du Quaternaire

Le recouplement des différentes données ($\delta^{18}\text{O}$ des glaces, $\delta^{18}\text{O}$ des tests de foraminifères, concentrations en GES des bulles de gaz glaciaires, analyses polliniques) permet de connaître le climat du Quaternaire.

Le climat du Quaternaire correspond à une alternance de périodes froides dites GLACIAIRES et de périodes plus chaudes dites INTERGLACIAIRES. Ces cycles glaciaires durent environ 100 000 ans. Actuellement, la Terre se situe dans une période interglaciaire.



En plus des cycles de 100 000 ans, on observe la présence de cycles plus courts de 43 000 et 19 000 ans. Comment expliquer cela ?

III- Les causes de variations climatiques récentes et la construction de modèles

Problématique : Comment expliquer les modifications climatiques du Quaternaire ?

TD4 : Vers la construction d'un modèle climatique du Quaternaire

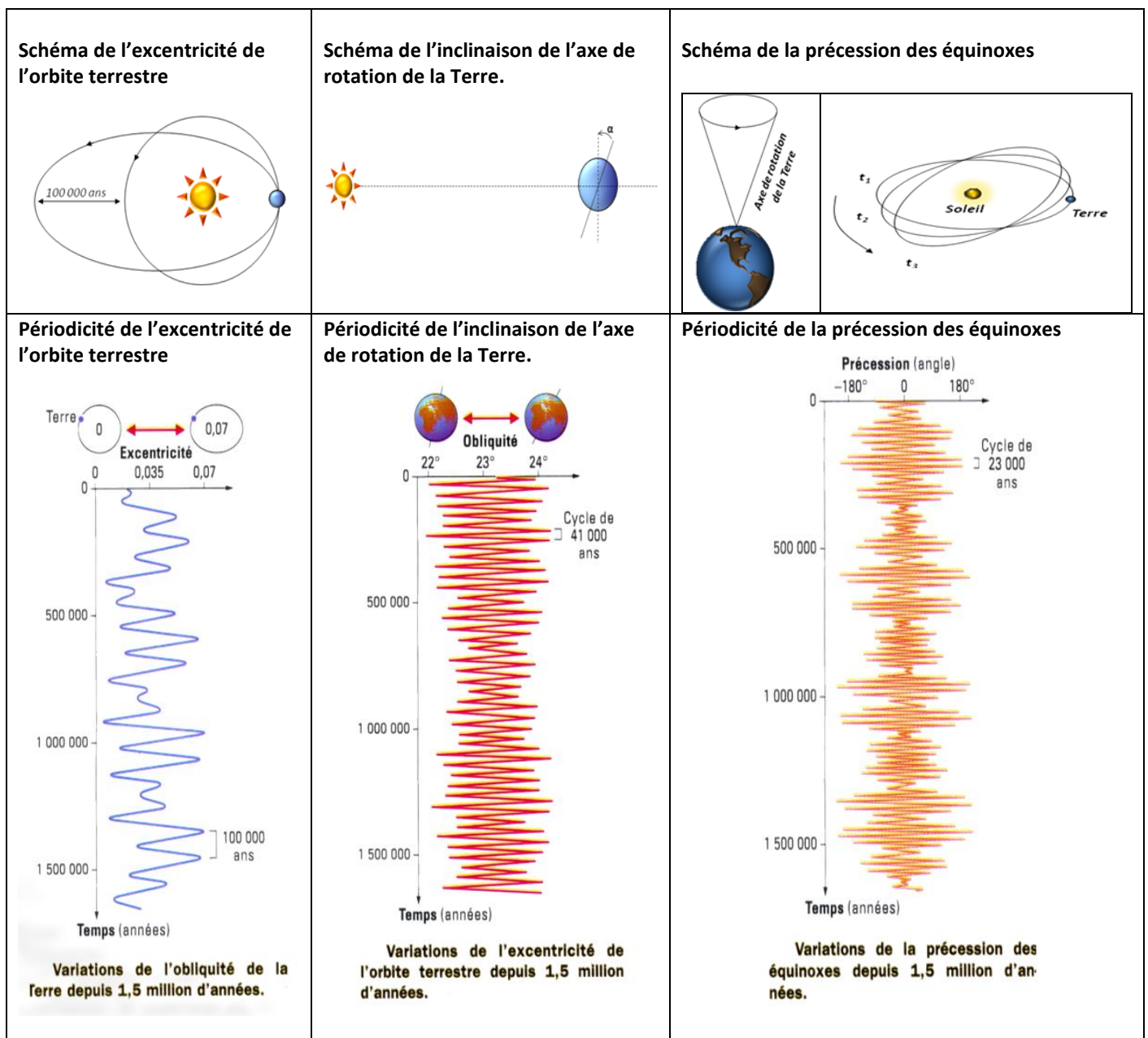
Objectifs :

- Identifier les principaux paramètres contrôlant le climat
- Identifier sur quels paramètres l'Homme peut agir

1- Les paramètres astronomiques ou paramètres de Milankovitch

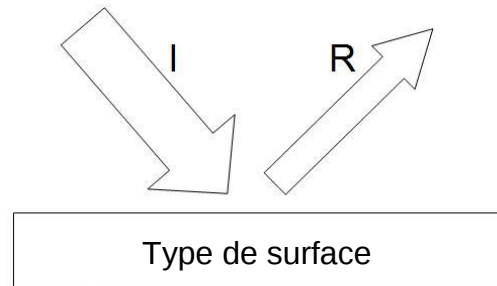
La proximité ou l'éloignement de la Terre avec le Soleil modifie l'insolation (ensoleillement) globale de la Terre et ainsi la chaleur présente sur Terre. Les paramètres de Milankovitch sont :

- L'excentricité de l'orbite terrestre qui présente une période de 100 000 ans.
- L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre qui présente une période de 41 000 ans.
- L'orientation de l'axe de rotation de la Terre qui présente une période de 23 000 ans.
- La précession des équinoxes correspond également à la rotation de l'ellipse de l'orbite terrestre selon une période de 23 000 ans.



2- L'albédo, un paramètre amplificateur :

Type de surface	Albédo (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	0,30 à 0,40
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1



Principe de l'albédo

L'albédo est une grandeur physique définie comme le rapport de l'énergie solaire réfléchi (R) sur l'énergie incidente (I).

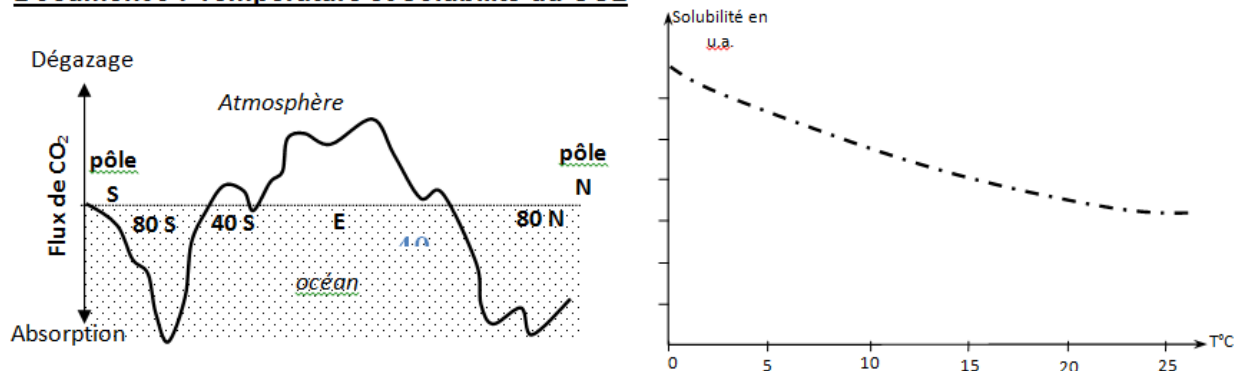
Une surface blanche ou un miroir renvoient efficacement les rayons solaires et possèdent un albédo proche de 100% (soit 1). Une surface noire capte presque tous les rayons incidents et son albédo est proche de 0.

- L'albédo est le rapport de l'énergie solaire réfléchi sur l'énergie incidente.
- La neige et la glace ont un albédo très supérieur à celui de la végétation ou de l'eau liquide.
- Le développement des calottes glaciaires augmente l'albédo global de la planète et accentue son refroidissement.
- La diminution des calottes glaciaires et le développement de la végétation diminuent l'albédo global de la planète et accentuent son réchauffement.

3- La solubilité du CO₂, un paramètre amplificateur :

Le CO₂ participe à l'effet de serre de la planète. Sa concentration dans l'atmosphère est en équilibre avec celle de l'océan. Lorsque la température augmente, la solubilité du CO₂ dans l'océan diminue, l'équilibre précédent est déplacé : du CO₂ passe de l'océan dans l'atmosphère ce qui provoque une augmentation des températures et donc une amplification du réchauffement.

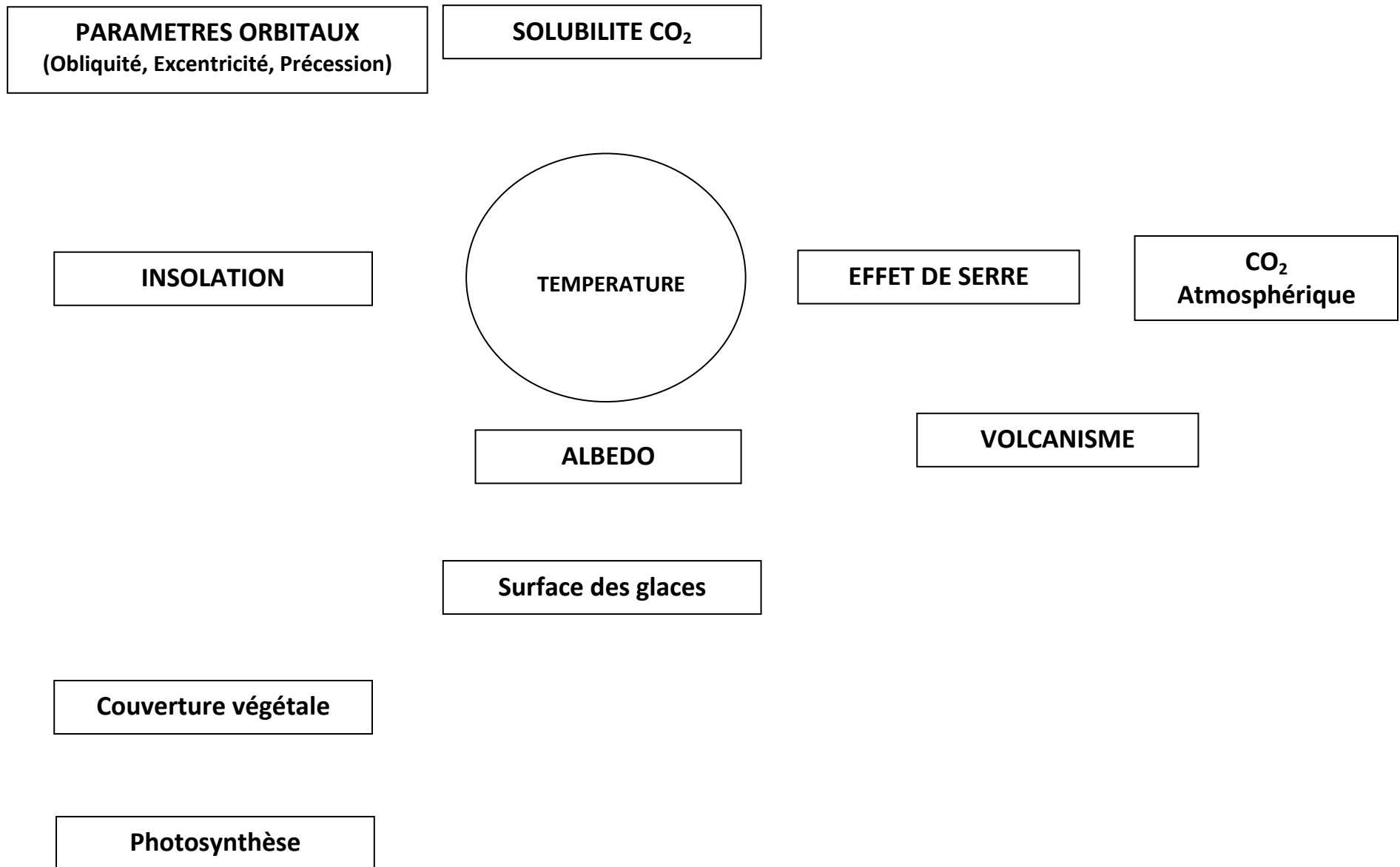
Document 5 : Température et solubilité du CO₂



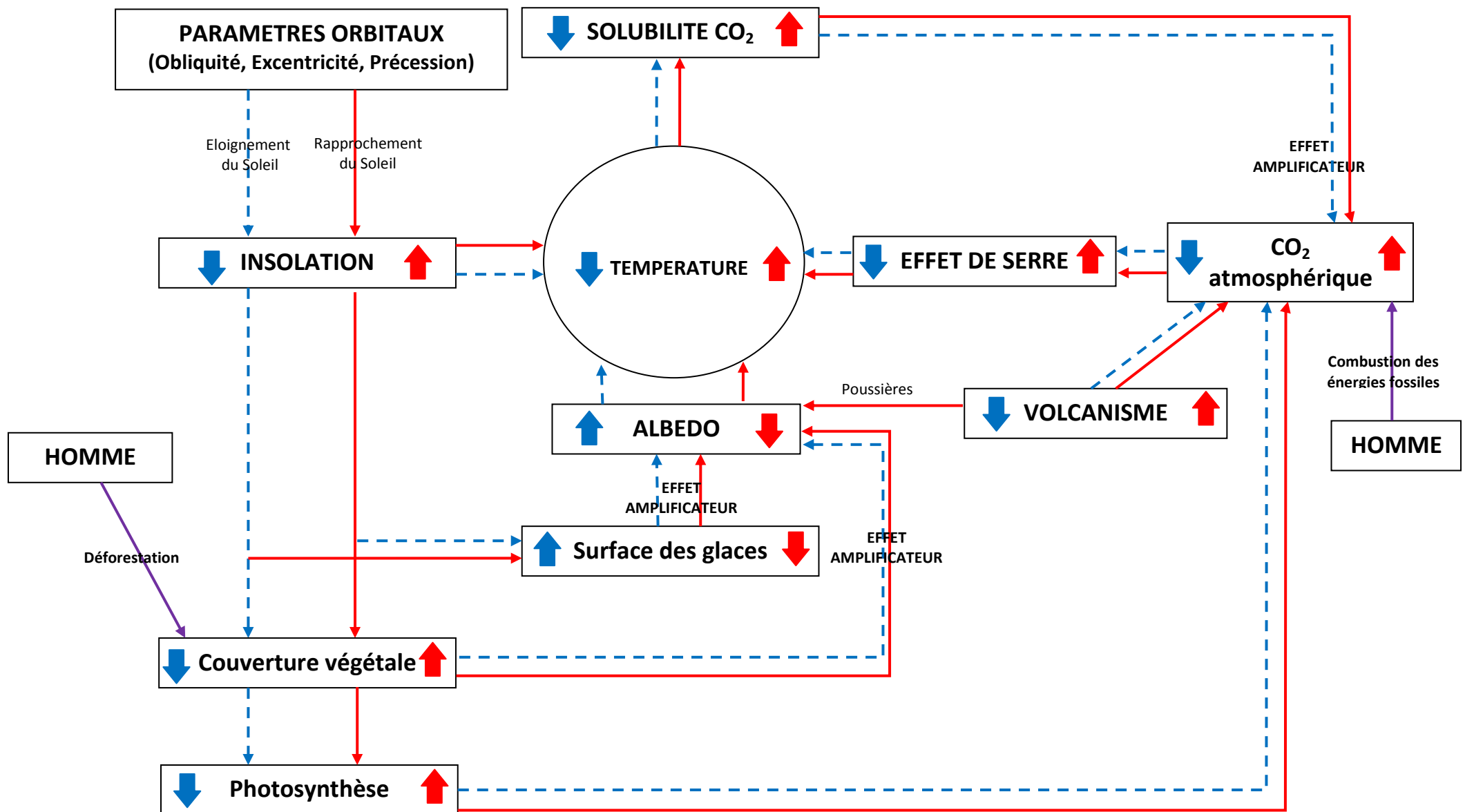
4- La dynamique des enveloppes fluides

La circulation atmosphérique et océanique tend à redistribuer le surplus d'énergie reçue au niveau de l'équateur vers les pôles. Ces circulations limitent ainsi les écarts de température attendus entre l'équateur et les pôles liés à la sphéricité de la Terre.

Toute perturbation des courants océaniques pourrait entraîner des modifications climatiques locales drastiques (ex : arrêt du Gulf Stream et refroidissement important en Europe).



Modèle climatique simplifié des climats du Quaternaire et impact de l'Homme



Modèle climatique simplifié des climats du Quaternaire et impact de l'Homme

Chapitre 3

Le climat aux grandes échelles de temps (600 MA)

I- Les indices climatiques anciens

TD5 : Variations climatiques du Carbonifère et du Crétacé

1. Une période froide : la glaciation Carbonifère – Permien.

Le Carbonifère (-360 à -295 Ma) est caractérisé par

- la présence d'un super continent (Pangée) dont la plus grande partie se trouve au pôle Sud.
- la présence de beaucoup de tillites (dépôts glaciaires) au pôle Sud permettant de supposer l'existence d'un glacier très important qui descendait jusqu'à 30°S.
- la présence de charbon et de crocodiles dans l'Hémisphère Nord et l'Equateur. Le charbon correspond à un climat froid tempéré qui s'étendait entre 30°S et 30°N. Confirmation avec les crocodiles qui vivaient à des températures proches de 15°C.
- La présence de régions à évaporites et à kaolinite attestant d'un climat chaud mais très localisé.

CONCLUSION : Le carbonifère correspond à une période de refroidissement qui perdure au Permien : c'est la **glaciation Permo-Carbonifère**.

2. Une période chaude : le Crétacé.

Le Crétacé (-135 à -65Ma) est caractérisé par :

- la présence de continents séparés et répartis dans les deux hémisphères.
- l'absence de tillites = pas de glaces aux Pôles
- la présence du charbon et des crocodiles aux pôles qui montrent un climat tempéré froid aux Pôles
- la présence de calcaires, évaporites, kaolinite entre 30°N et 30°S attestant d'un climat chaud
- la présence de rudistes (coraux) qui formaient des récifs en mers chaudes

CONCLUSION : Le crétacé était plutôt chaud

Pb : Comment se fait-il que les continents aux 2 Pôles ne soient pas englacés ??

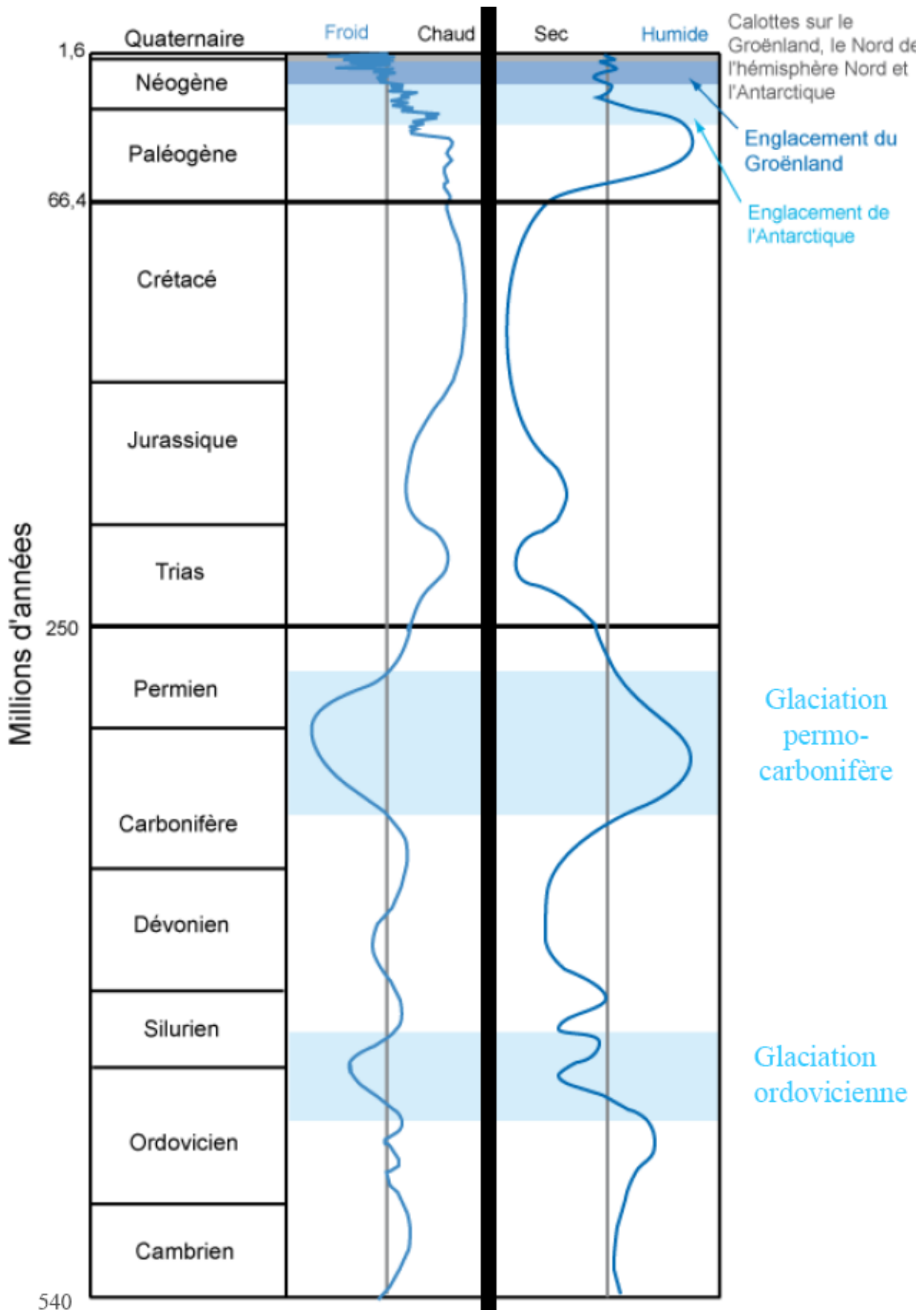
3. Bilan : les indices des variations climatiques

Les indices des variations des climats anciens sont les suivants :

- Les sédiments
- Les fossiles
- La position des continents

Type d'indices	Climat froid	Climat chaud
Sédiments	- Moraine - Tillites - Bloc erratiques - Roches striées	- Evaporites (halite, sel gemme) - Bauxite - Charbon - Kaolinite (argile)
Fossiles	- Mammouths - Conifères - Feuilles avec beaucoup de stomates (peu de CO₂) ...	- Coraux - Champsosaures, reptiles - Tortues - Fougères - Feuilles avec peu de stomates (beaucoup de CO₂)
Position des continents	- Continents dispersés (plus de climats méditerranéens) - Présence de continents aux Pôles (englacement et favorisation de l'albédo)	- Pangée - Peu de continents présents aux Pôles

II- L'histoire climatique de la Terre depuis 600 MA



III- Les causes des variations des climats anciens

Au Crétacé, on remarque que les 2 Pôles ne sont pas englacés. La température globale est trop élevée pour permettre l'accumulation de glaces et la formation de calottes glaciaires. Nous pouvons émettre l'hypothèse que les GES sont alors présents en grande quantité dans l'atmosphère.

Le cycle du Carbone est donc à l'origine des variations climatiques anciennes.

1- Les processus qui tendent à diminuer la teneur en CO₂ atmosphérique

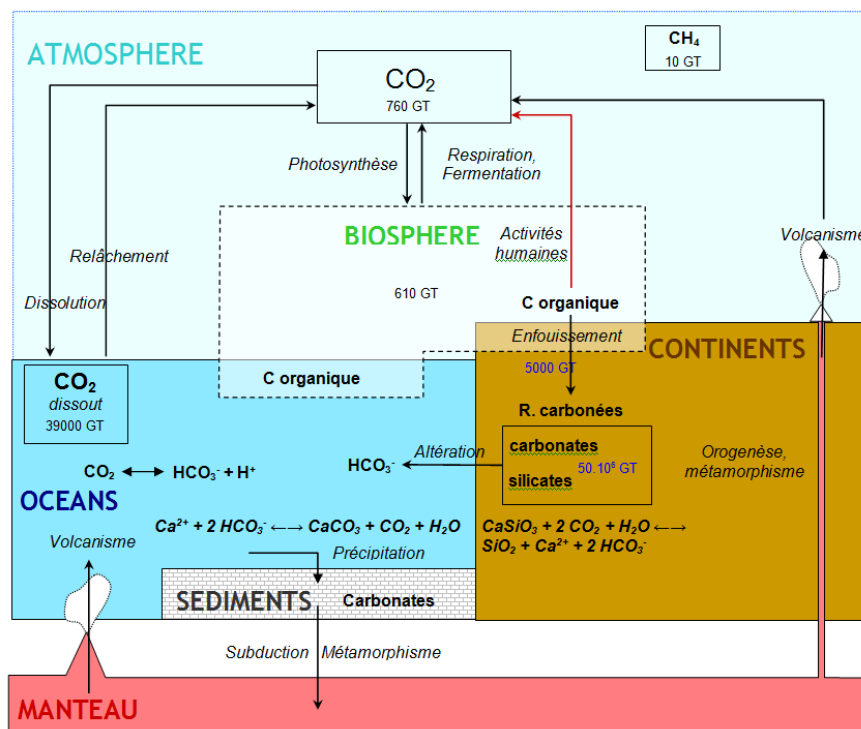
- Le piégeage de la matière organique dans les roches carbonées stocke du dioxyde de carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse et l'enfouissement (charbons du Carbonifère).
- L'altération des silicates (de calcium et de magnésium) des roches magmatiques et métamorphiques continentales consomme du dioxyde de carbone.
- Sur les continents, la dissolution des carbonates consomme du dioxyde de carbone.

2- Les processus qui tendent à augmenter la teneur en CO₂ atmosphérique

- le volcanisme des points chauds et l'accroissement de l'activité des dorsales provoquent un flux de dioxyde de carbone du manteau vers l'atmosphère.
- Dans les océans, la précipitation des carbonates libère du dioxyde de carbone.

NB : Sur des échelles de temps de plusieurs millions d'années, les réactions de précipitation - dissolution des carbonates ont peu d'impact sur la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère (le bilan des réactions est nul = en équilibre). Il en est de même pour les réactions Respiration et Photosynthèse qui sont en équilibre.

Cycle du carbone



IV- La formation de l'atmosphère et les variations

La Terre possède une atmosphère particulière propice à la vie. Nous savons aujourd'hui que l'atmosphère initiale de la Terre était bien différente de celle présente actuellement. Même si la concentration en CO_2 a fréquemment varié depuis 500 Ma, elle est malgré tout restée très basse par rapport aux concentrations que l'on retrouve sur d'autres planètes telluriques.

Problème posé : Comment peut-on expliquer cette spécificité de la Terre et quels sont les processus qui ont permis l'évolution de l'atmosphère primitive?

1- L'atmosphère terrestre formée par dégazage du manteau

Suite à la formation de la Terre (-4,5 Ga) par accréation (Voir origine de la chaleur interne du globe – géothermie, Cours de SVT obligatoire), l'atmosphère s'est formée par dégazage intense du manteau terrestre. L'atmosphère primitive était riche en vapeur d'eau (80%), en CO_2 (10%) (x100 000 par rapport à l'actuel !), en N_2 (5%) en SO_2 , H_2S et dépourvue d' O_2 . Ces résultats ont été obtenus par des analyses des gaz produits par une météorite de même nature chimique que la Terre (=chondrite) après chauffage.

2- Un piégeage massif du CO_2

Avec le refroidissement de la Terre, la vapeur d'eau présente va se condenser et former de l'eau liquide et les océans. Dès leur formation, les océans captent rapidement le CO_2 atmosphérique sous forme de carbonates (HCO_3^-). Ces carbonates peuvent également précipiter et former des roches sédimentaires : principalement des calcaires (CaCO_3), ce qui permet un piégeage à long terme.

3- D'une atmosphère réductrice à oxydante

La découverte de gisements de fers rubanés dans les océans atteste la présence d' O_2 dans les océans capable d'oxyder le fer. Ainsi, avant 2,2 Ga, l'oxygène produit par les êtres vivants photosynthétiques (stromatolithes) est solubilisé dans les océans mais n'est toujours pas présent dans l'atmosphère.

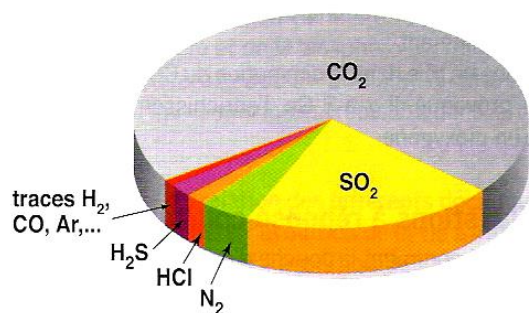
A partir de -2,2 Ga, on observe des formations de gisements de fers continentaux et la disparition des gisements d'uranite qui témoignent de la présence d' O_2 dans l'atmosphère. L'atmosphère devient donc oxydante à partir de -2,2 Ga, l' O_2 piégé jusqu'alors dans les océans passe dans l'atmosphère.

4- La vie et l'évolution de l'atmosphère

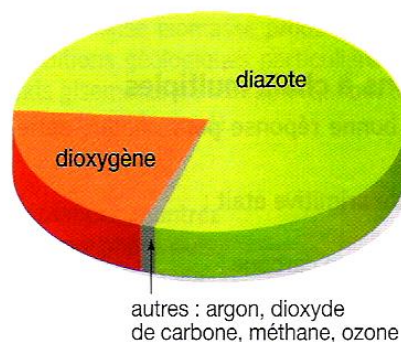
La production d' O_2 est liée à l'apparition de la photosynthèse chez des procaryotes (cyanobactéries). Cette production est attestée par la mise en place des stromatolithes (à partir de -3,5 Ga). Les océans vont s'enrichir en O_2 jusqu'à leur saturation et le passage du O_2 dans l'atmosphère. A partir de 1,5 Ga, la production d'une couche d'ozone O_3 a permis la conquête du milieu aérien il y a 360 Ma environ.

Une atmosphère primitive très différente de l'atmosphère actuelle

Atmosphère primitive

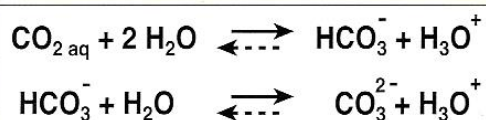


Atmosphère actuelle



Une chute rapide du taux de CO₂ atmosphérique

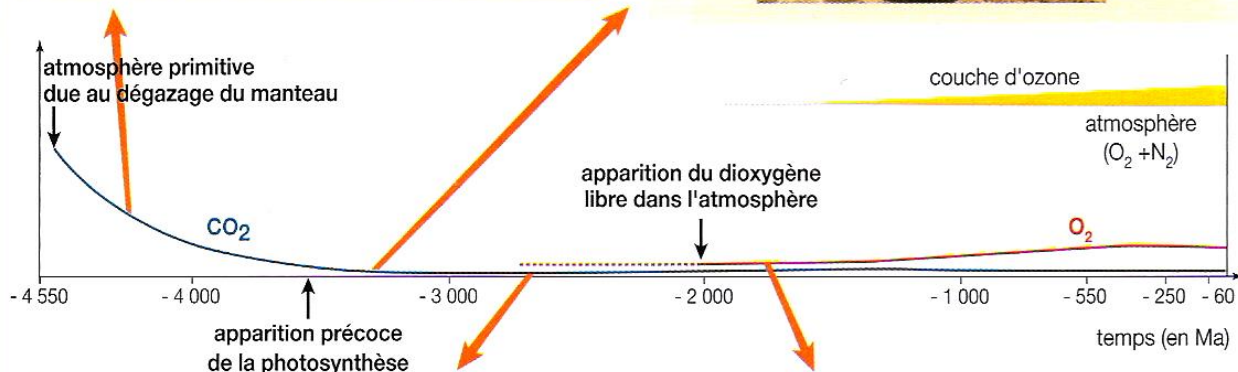
Un CO₂ en grande partie piégé sous forme de carbonates dans les océans.



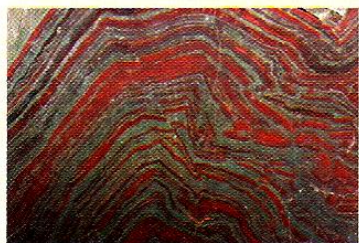
Les carbonates précipitent et forment des roches sédimentaires d'où un piégeage à long terme du CO₂.

Une libération de dioxygène en milieu marin

Des cyanobactéries photosynthétiques (à l'origine des stromatolites) libèrent du dioxygène.



Un piégeage du dioxygène dans les sédiments



Fers rubanés, témoins de la présence de dioxygène dans l'eau des océans

Tant que l'eau des océans contient du fer ferreux, celui-ci est oxydé en fer ferrique qui forme les couches rouges de « fers rubanés » dans les sédiments.

Une libération de dioxygène dans l'atmosphère



Paléosols rouges, témoins d'une atmosphère oxydante

Quand il n'y a plus eu de fer ferreux dans les océans, le dioxygène a diffusé dans l'atmosphère : celle-ci, devenue oxydante, a contribué à l'explosion de la vie.

Chapitre 4

Les climats futurs et les modèles prédictifs

I. Un diagnostic du climat du XX^e siècle

<http://co2climate.e-monsite.com/rubrique,variations-de-temperature,313034.html>

- Cadre général du climat :

- > Période glaciaire commencée il y a 20 MA.
- > Interglaciaire commencé il y a 10 000 à 12 000 ans.

- La vérité sur les activités anthropiques (de 1750 à 2000) – Les constats du GIEC.

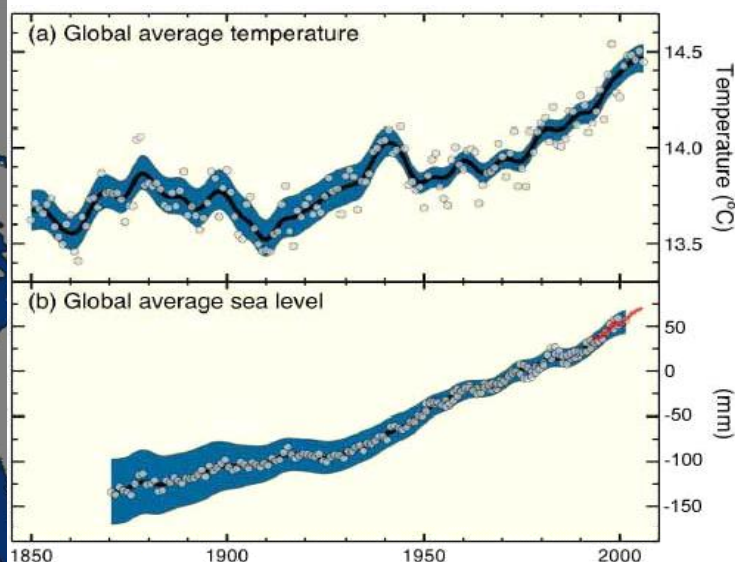
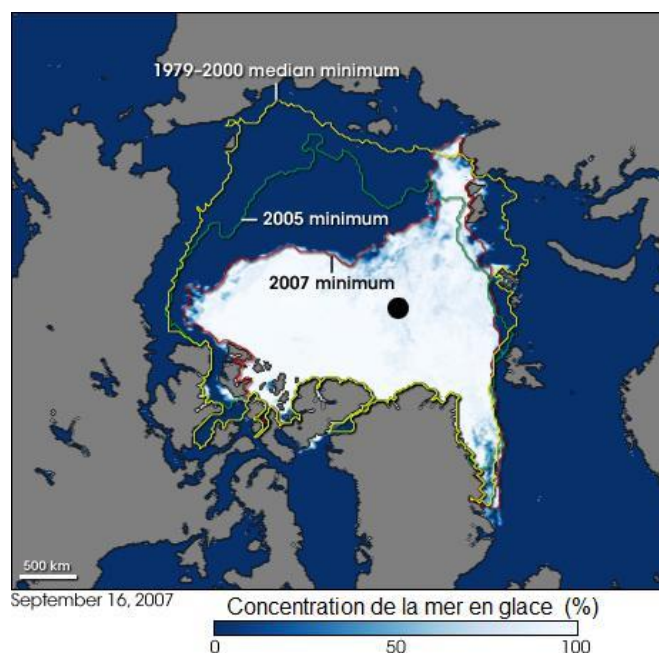
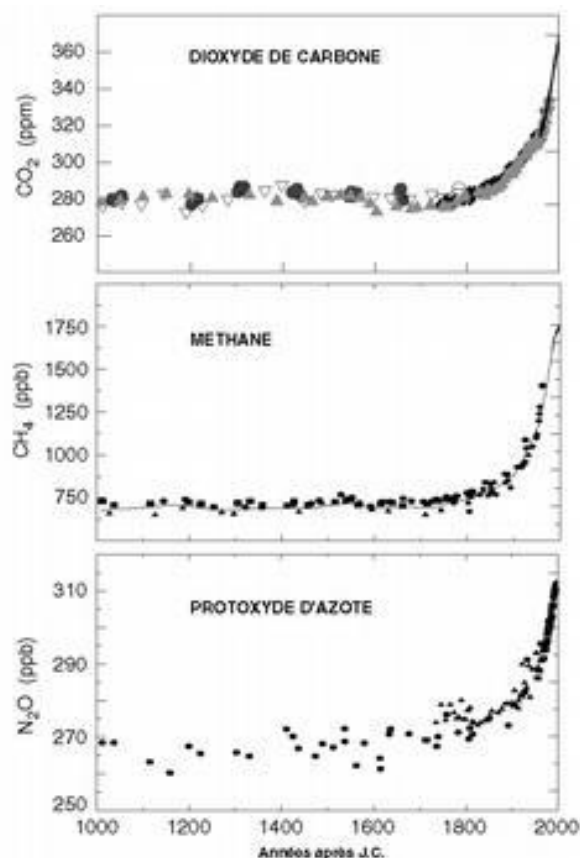
GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (ou IPCC en anglais).

Le GIEC a été créé en 1988 par le G7. Il est désormais un organisme de l'ONU et rassemble plus de 3000 chercheurs agréés par plus de 140 États. Ce n'est pas un laboratoire de recherche. Il réalise à intervalle régulier des rapports synthétisant toutes les données sur le réchauffement planétaire. Depuis le début de son existence, le GIEC a rendu quatre rapports en 1990, 1995, 2001 et 2007. Les bilans du GIEC sont librement consultables à l'adresse :

<http://www.ipcc.ch/languages/french.htm>

<http://www.greenfacts.org/fr/changement-climatique-re4/index.htm>

Paramètre	Variation
Teneur en CO ₂ (dioxyde de carbone)	+30%
Teneur en CH ₄ (méthane)	+ 145%
Teneur en N ₂ O (protoxyde d'azote)	+ 15%
Effet de serre	+1% (240 + 2.45 Watt/m ²)
Températures globales moyennes	+ 0,3 à 0,6°C
Niveau de la mer :	25 cm.(dilatation thermique des océans principalement)

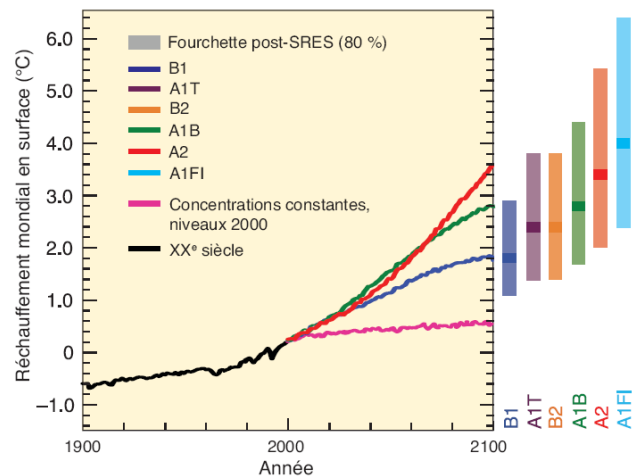


II. Modéliser le climat du XXI^e siècle et évaluer les conséquences ?

Actuellement, le GIEC envisage une augmentation moyenne des températures de 1,8°C à 4°C, une hausse du niveau des océans de près de 60 cm d'ici à 2100 et la généralisation de vagues de chaleur et d'épisodes de fortes précipitations.

Les quatre familles de scénario^{59, 60, 61} du quatrième rapport et les prévisions des hausses de températures globales moyennes en 2100

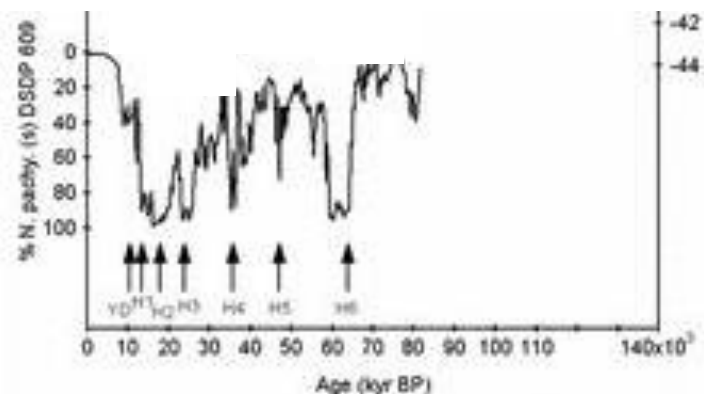
Source : GIEC ⁵⁷	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
	A1	B1
Globalisation (Monde homogène)	Croissance économique rapide (groupes: A1T/A1B/A1FI) 1.4 - 6.4 °C	Durabilité environnementale globale 1.1 - 2.9 °C
	A2	B2
Régionalisation (Monde hétérogène)	Développement économique avec une orientation régionale 2.0 - 5.4 °C	Durabilité environnementale locale 1.4 - 3.8 °C



III. Des incertitudes et des risques de « surprise » ?

Les experts attirent l'attention sur la possibilité de « surprises climatiques ». Cette notion doit beaucoup à la découverte de l'existence de variations climatiques rapides au cours de la dernière période glaciaire et de la transition qui a conduit il y a un peu plus de 10000 ans au climat actuel (DRYAS RECENT).

Les oscillations du climat durant cette période sont très rapides (parfois quelques dizaines d'années) et très violentes : plus de 10°C d'amplitude.



IV. Les actions de préservation des climats

- Les Sommets de la Terre

Les sommets de la Terre sont des rencontres entre dirigeants mondiaux ayant lieu tous les dix ans. Elles constituent une occasion pour se pencher sur l'état de l'environnement de la planète, et pour définir les moyens de stimuler le développement durable au niveau mondial.

- Premier Sommet de la Terre (1972) - Stockholm
- Sommet non officiel (1982) - Nairobi
- Deuxième Sommet de la Terre (1992) - Rio
- Troisième Sommet de la Terre (2002) – Johannesburg
- Quatrième Sommet de la Terre (2012) – Rio (Rio +20)

- Protocole de Kyoto (1997)

Le Protocole de Kyoto s'est tenu en 1997 à Kyoto (Japon). La plupart des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et des pays à économie en transition) se sont engagés à ramener leurs émissions anthropiques de gaz à effet de serre à 5 % au-dessous de leurs niveaux de 1990 pendant la période d'engagement (2008-2012). Le Protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005.

Quelques références :

- <http://www.ipcc.ch/languages/french.htm>
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-evolution-du-climat.xml>