DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

LES TP DU CEA

Études paléoclimatiques



Table des matières

ÉTUDES PALÉOCLIMATIQUES

INTRODUCTION : LA MACHINE CLIMATIQUE 3

- La planète Terre 3
- Ce qu'on appelle le climat 6
- L'effet de serre 8
- Différentes influences pour le climat 9
  - Les caractéristiques de l'orbite terrestre 9
  - Les grandes variations des caractéristiques de l'orbite terrestre 10
  - Comparaison entre les variation des causes externes et les variations du paléoclimat 13
  - Quelques causes internes de variation du climat 14
  - Les variations climatiques 17
  - Une thermodynamique et une mécanique hore équilibre 18
  - Les effets de seuil 19
- L'activité humaine 19
- Les données météorologiques 21
- Les archives climatiques 21

ACTIVITÉS 23

Objectif 23

Les forages polaires 23

Datation 24

Détermination de la température du site de forage à l'époque de la formation de la glace 24

Analyse chimique des bulles d'air 25

Étude du forage effectué au Dôme C 25

- **Activité 1 :** Localisation 26
- **Activité 2 :** Relation profondeur – âge 26
- **Activité 3 :** Relation δD – température 26
- **Activité 4 :** Calcul des températures (Dôme C) 27
- **Activité 5 :** Relation âge – ΔT 28
- **Activité 6 :** Corrélation entre température et concentration en CO_2 28

Produit par : CEA / Direction de la Communication / Service Édition Événements

Auteurs : François Saint-Jalm, Professeur de Physique - Chimie à l'Éducation Nationale
et Marc Delmotte, Ingénieur de Recherche au Laboratoire des Sciences du Climat (CEA/CNRS)

Conception graphique : Lucille Colombel, CEA / Direction de la Communication
Image couverture : Éric Aristidi, Maître de Conférence à l'Université de Nice-Sophia Antipolis

INTRODUCTION
LA MACHINE CLIMATIQUE

La Planète Terre

Mise à part Mercure, les planètes du système solaire tout comme le satellite de Saturne, Titan, possèdent une atmosphère qui est le siège d'évolutions à court, moyen et long terme. Parmi ces corps, la Terre a la particularité d'avoir gardé à sa surface une quantité importante d'eau dont l'origine n'est pas complètement élucidée (comètes, chondrites …). La situation de la Terre par rapport au Soleil, ainsi que la relative stabilisation de son axe de rotation par la Lune, ont permis à cette eau d'exister sous ses trois états, solide, liquide et gaz, dans des proportions ayant évolué au cours des âges.

L'essentiel de cette eau constitue de vastes océans où circulent des courants liés aux différences de température et de salinité, à la rotation de la Terre, à la distribution des terres émergées et aux vents.



Figure 1 : *La Terre. Image : Météosat/ESA.*

En contact avec l'atmosphère, l'eau des océans s'évapore et est ensuite transportée par les vents sous forme de vapeur ou bien à l'état liquide ou solide dans les nuages. Le cycle de l'eau se poursuit alors avec les précipitations là où les conditions de température et de pression favorisent la croissance des gouttes ou des cristaux de neige.

Contrairement à ce qui a lieu sur certains satellites des planètes gazeuses (Europe qui gravite autour de Jupiter ou Encelade qui gravite autour de Saturne, par exemple), l'eau de la Terre ne recouvre pas totalement le socle rocheux mais en laisse émerger une partie. Environ un quart de la surface terrestre est hors de l'eau.

La Terre possède aussi la particularité d'être le siège de ce qu'on appelle la tectonique des plaques. La croûte terrestre est ainsi divisée en une quinzaine de plaques qui se déplacent les unes par rapport aux autres à cause des mouvements du manteau asthénosphérique[1] sous-jacent. Cette tectonique se manifeste par la formation de zones de divergence (les plaques s'éloignent), de zones de convergence (les plaques se rapprochent) et de zones de décrochement (les plaques glissent horizontalement les unes par rapport aux autres). Ces mouvements sont la cause des séismes, du volcanisme (à l'exception du volcanisme de point chaud) et de l'orogenèse (création de chaînes de montagnes). Sur le long terme, ils sont aussi la cause d'une lente redistribution des terres émergées à la surface du globe : elles se sont ainsi plusieurs fois regroupées en un seul continent puis dispersées en plusieurs, chaque assemblage pouvant voyager entre les pôles et l'équateur.

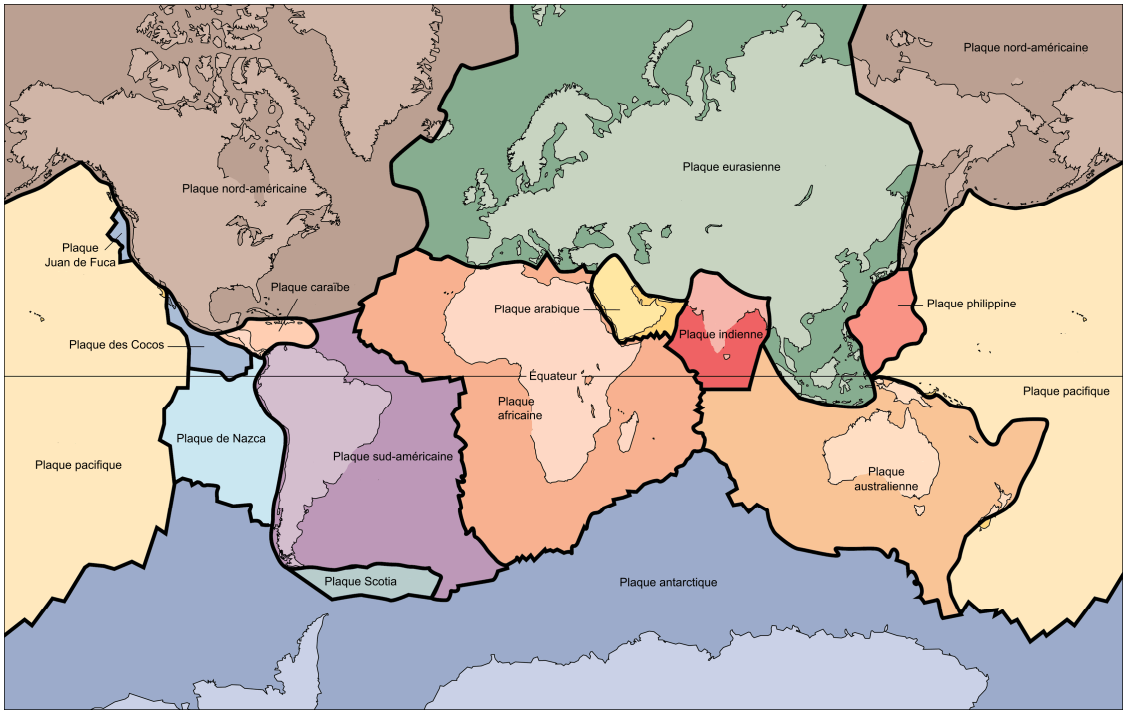


Figure 2 : *Les plaques tectoniques actuelles. Image : USGS (United States Geological Survey).*

[1] L'asthénosphère est la partie ductile du manteau, sur laquelle se déplacent les plaques tectoniques (rigides).

Ci-dessous : l'évolution de la distribution des terres émergées au cours des 400 derniers millions d'années.

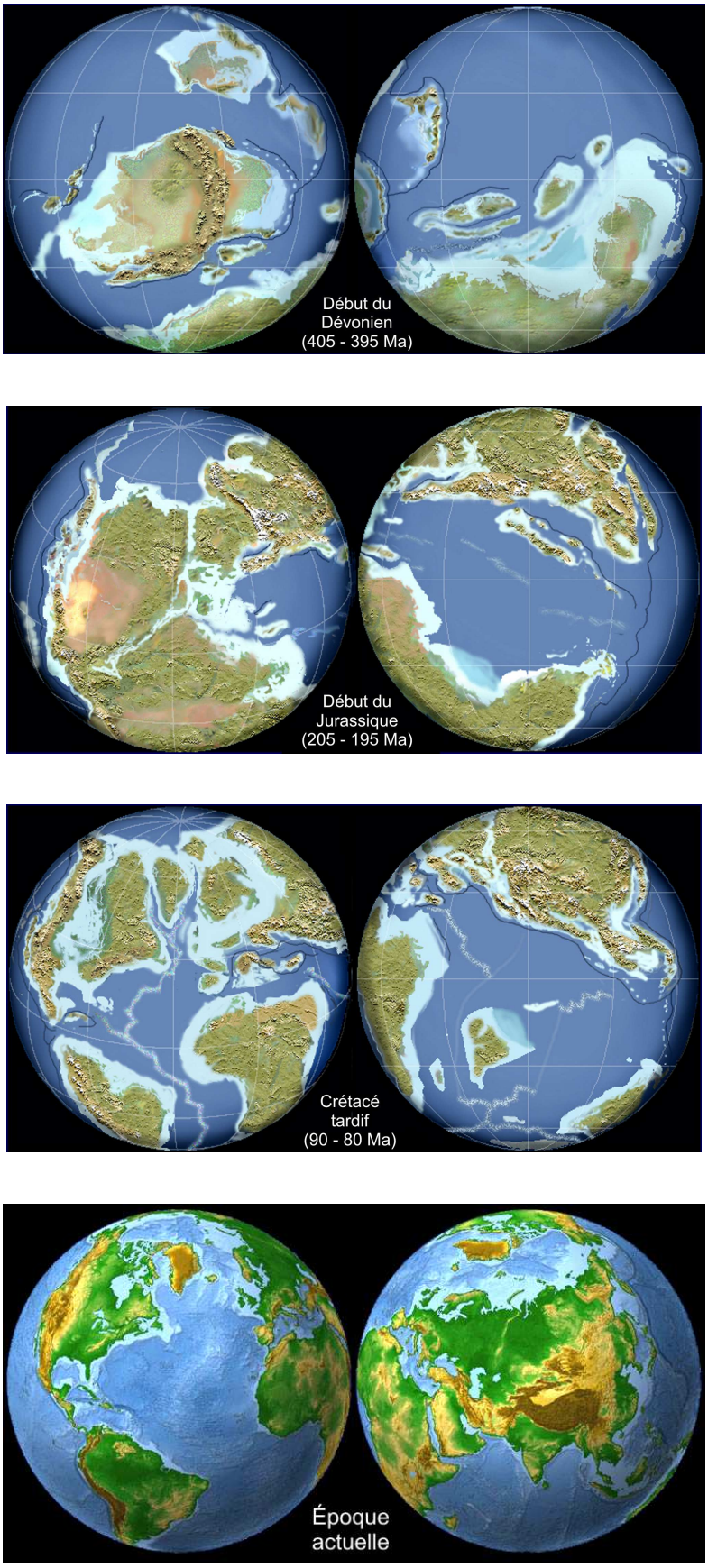


Figure 3 : *Évolution de la distribution des Terres lors des 400 derniers millions d''années. Images : Northern Arizona University.*

Enfin, la Terre est la seule planète que nous connaissions à ce jour dont nous sommes certains qu'elle abrite des êtres vivants. Ils constituent un vaste écosystème où les différentes espèces interagissent les unes avec les autres et avec tout ce qui se trouve en surface : les sols, l'eau, l'air. Ainsi, l'atmosphère, qui est composée de différents gaz, de vapeur d'eau, d'aérosols[2], a vu sa composition considérablement évoluer au cours du temps. Initialement réductrice, elle est devenue oxydante à la suite de l'absorption du dioxyde de carbone et de la production massive de dioxygène par les cyanobactéries.

Composition de l'atmosphère au voisinage de la surface (0 à 25 km).
Les valeurs données correspondent à une atmosphère sèche. L'eau est comptabilisée à part.
En bleu italique, les gaz à effet de serre.

GAZ	FORMULE CHIMIQUE	ABONDANCE (en volume)
Diazote	N_2	78,084 %
Dioxygène	O_2	20,946 %
Argon	Ar	0,934 %
Dioxyde de carbone	*CO_2*	*0,0395 % (2013)*
Néon	Ne	$1{,}818 \cdot 10^{-3}$ %
Hélium	He	$0{,}524 \cdot 10^{-3}$ %
Méthane	*CH_4*	*$0{,}1745 \cdot 10^{-3}$ % (2013)*
Krypton	Kr	$0{,}114 \cdot 10^{-3}$ %
Dihydrogène	H_2	$0{,}055 \cdot 10^{-3}$ %
Monoxyde d'azote	NO	$0{,}05 \cdot 10^{-3}$ %
Oxyde nitreux	*N_2O*	*$0{,}03 \cdot 10^{-3}$ % (2013)*
Xénon	Xe	$9 \cdot 10^{-6}$ %
Ozone	*O_3*	*$4 \cdot 10^{-6}$ %*
CFC		*$80 \cdot 10^{-9}$ %*
Eau (vapeur)	*H_2O*	*0 à 4 %*

Ce qu'on appelle le climat

Nous sommes quotidiennement concernés par la météorologie, c'est-à-dire par le temps qu'il fait. Lorsque nous nous préoccupons de cette météorologie, notre intérêt est toujours limité dans le temps et dans l'espace. Pleuvra-t-il ou au contraire fera-t-il beau tel jour dans telle ville où je compte me rendre ? Tel est le type de questions que nous nous posons et auxquelles les organismes de prédiction météorologique tentent de répondre.

[2] Ensemble de particules, solides ou liquides en suspension dans un gaz.



Figure 4 : *Exemple de carte météorologique (Météofrance)*
Cette carte est valable lundi 1er juillet 2013 à 8 h.
Image : Météofrance.

Le climat, en revanche, tient compte de la moyenne et de la distribution statistique des paramètres atmosphériques sur un territoire donné et pour une période donnée (une trentaine d'années). Les paramètres considérés sont, entre autres, la température, le degré d'humidité, le régime des vents, les précipitations … On définit ainsi des climats régionaux et un climat global.

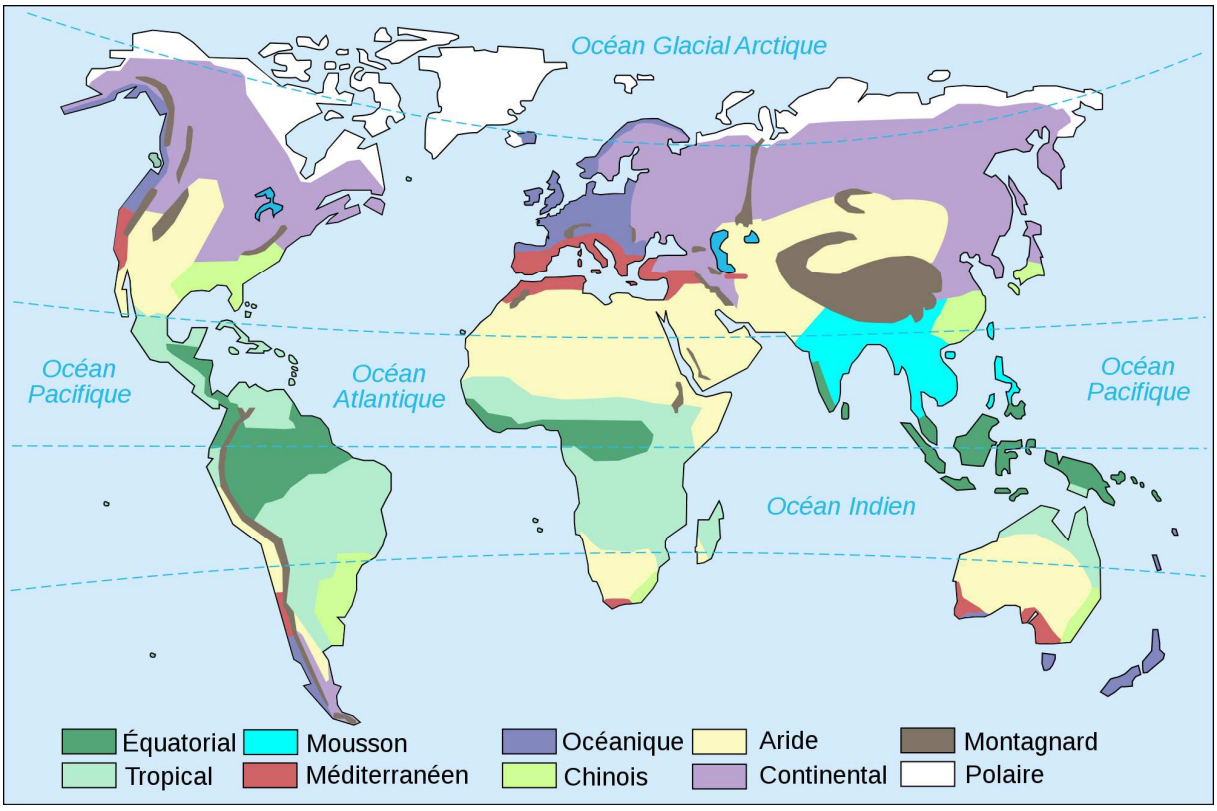


Figure 5 : *Carte simplifiée des climats mondiaux. Image : Wikipédia.*

L’effet de serre

La surface de notre planète reçoit en permanence de l’énergie sous forme de rayonnement électromagnétique en provenance de l’espace environnant et en provenance du sol. Il s’agit donc du rayonnement solaire, d’une part, et, 6000 fois moins intense, du rayonnement thermique produit par toute la masse de la Terre par les isotopes radioactifs à longue période qui y sont encore inclus et qui se désintègrent lentement (^{40}K, ^{232}Th, ^{235}U, ^{238}U).

Le rayonnement d’origine solaire est donc majoritaire : c’est le moteur de la machine climatique. Sa distribution spectrale est caractéristique d’une source thermique dont la température est de l’ordre de 6000 K. Une partie de ce rayonnement est renvoyée vers l’espace après avoir traversé l’atmosphère en totalité ou en partie : elle est diffusée par les nuages et les aérosols ou par la neige et la glace qui s’est accumulée dans les montagnes ou les régions polaires (glaciers, inlandsis). Ce qui n’est pas renvoyé traverse l’atmosphère, est absorbé par la surface (sols et océans) et la réchauffe. Une partie de ce rayonnement est cependant absorbé au passage par l’atmosphère elle-même, qui n’a pas la même transparence à toutes les longueurs d’onde.

La surface de la Terre, réchauffée par le rayonnement qu’elle a reçu du soleil et par l’énergie thermique qu’elle reçoit de couches internes, émet un rayonnement infrarouge caractéristique d’une source thermique dont la température est, en moyenne, 288 K (15 ℃). Une petite partie de ce rayonnement traverse l’atmosphère et s’en échappe vers l’espace. Mais la majeure partie est absorbée par ceux des gaz qui la composent et qui sont opaques pour ces longueurs d’onde (ce sont les **gaz à effet de serre** comme la vapeur d’eau, le dioxyde de carbone, le méthane ou l’oxyde nitreux). L’atmosphère se réchauffe donc, et cela d’autant plus qu’elle reçoit également de l’énergie thermique par contact avec le sol et par un transport d’énergie faisant intervenir l’évaporation de l’eau de surface et sa liquéfaction ou sa condensation en altitude. Cette atmosphère chauffée renvoie sous forme de rayonnement une partie de son énergie vers l’espace et l’autre partie vers le sol.

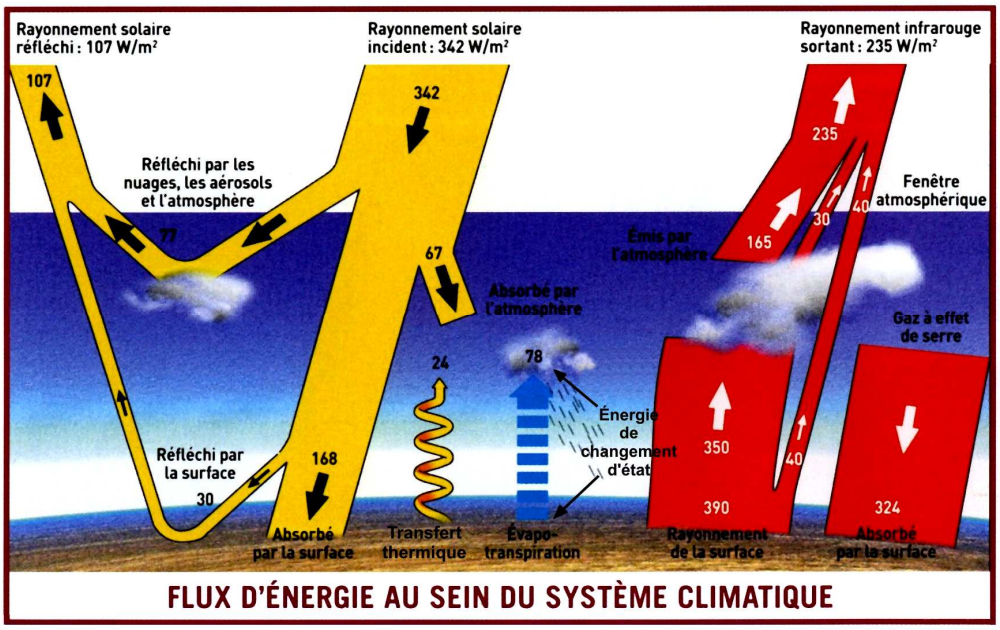


Figure 6 : *Bilan énergétique de l’atmosphère. Image : CEA.*

En résumé, La Terre renvoie vers l'espace autant d'énergie qu'elle en reçoit, mais l'atmosphère, qui est traversée par différents flux s'échauffe au passage car elle n'est pas parfaitement transparente à toutes les longueurs d'onde : l'énergie rayonnante qui la traverse stationne partiellement en elle sous forme d'énergie thermique. Comme ce résultat ressemble approximativement à ce qui se passe dans les serres utilisées en agriculture, l'échauffement de l'atmosphère qui en résulte est appelé « effet de serre ».

Différentes influences pour le climat

- Les caractéristiques de l'orbite terrestre.

L'énergie provenant du Soleil conditionne le fonctionnement de la machine climatique. On peut donc espérer comprendre les évolutions climatiques du passé en étudiant le comportement orbital de la Terre et ses variations au cours du temps.

✓ L'orbite de la Terre est une ellipse presque circulaire. Son excentricité[3] est très petite. Actuellement, la Terre tourne autour du Soleil à une distance presque constante qui la place dans ce qu'on appelle « la zone habitable », c'est-à-dire la zone où l'eau liquide d'une planète qui s'y trouve peut exister à sa surface.

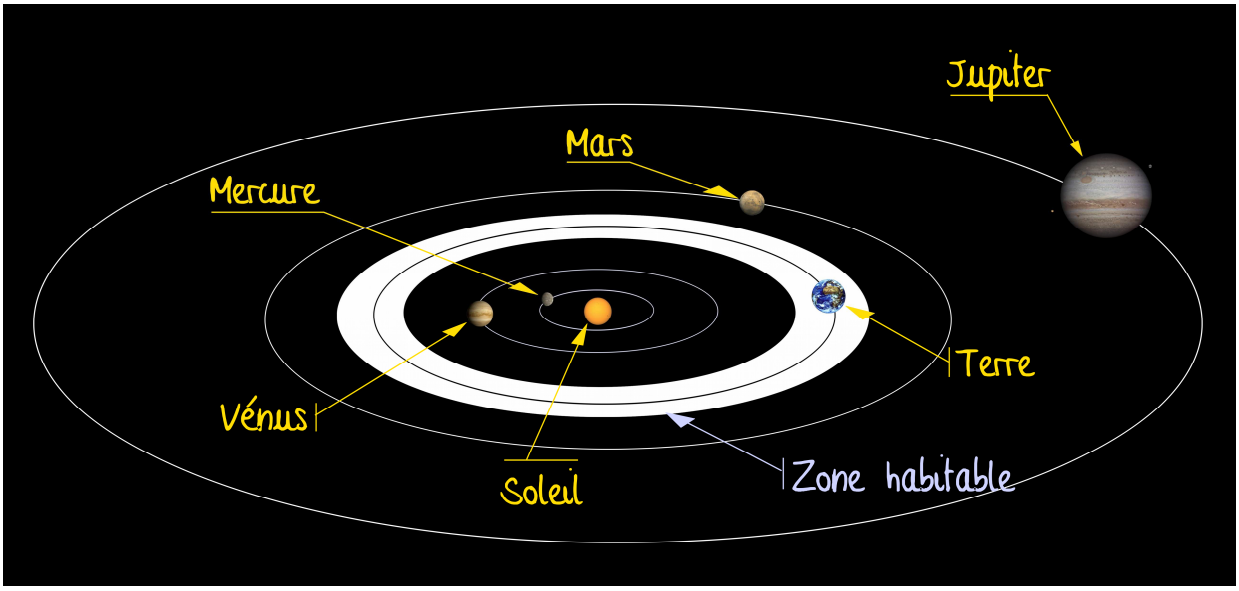


Figure 7 : *Zone habitable. Image : François Saint-Jalm (CEA).*

✓ L'axe de rotation de la Terre est incliné sur le plan de son orbite (l'écliptique). C'est la cause des saisons, puisqu'au cours d'une année notre planète va alternativement présenter

[3] Nombre, qui pour une ellipse est compris entre 0 (cas du cercle) et 1 (cas d'une ellipse infiniment allongée), permettant de décrire sa forme. Si « c » est la distance d'un des foyers au centre et si « a » est le demi-grand axe, l'excentricité est : $e = \frac{c}{a}$.

préférentiellement son hémisphère Nord au Soleil (Été du Nord – Hiver du Sud), puis les deux hémisphères de façon égale (Équinoxe de l'automne du Nord et du printemps du Sud), puis préférentiellement son hémisphère Sud (Hiver du Nord – Été du Sud) et enfin les deux hémisphères de façon égale (Équinoxe du printemps du Nord et de l'automne du Sud).

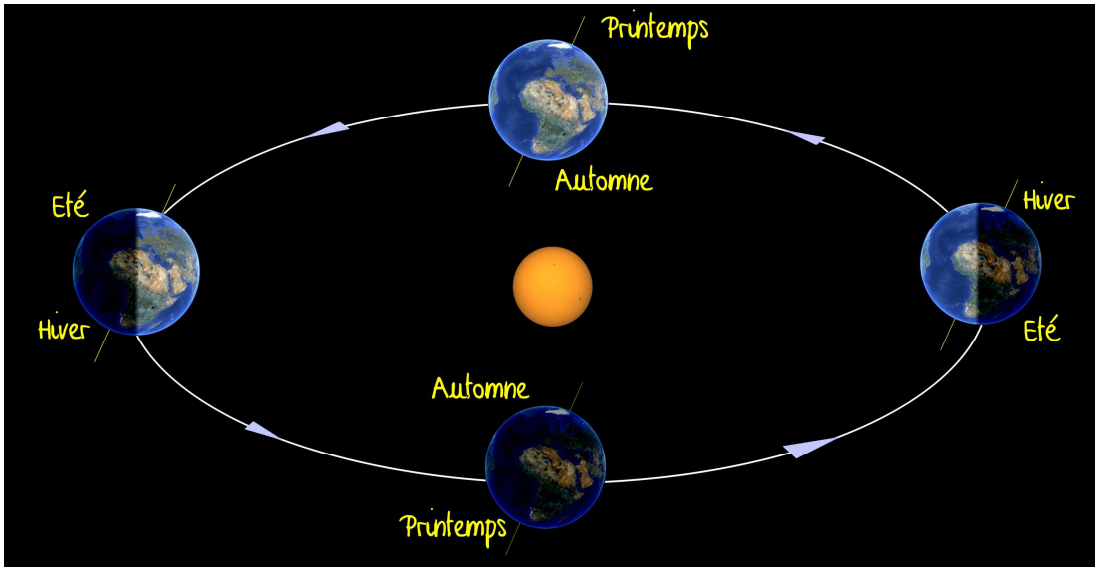


Figure 8 : *La suite des saisons des zones tempérées. Image : François Saint-Jalm (CEA).*

Ces paramètres constituent les **contraintes extérieures moyennes** qui sont un des paramètres qui déterminent le climat moyen de la Terre. En particulier on voit ici qu'outre un flux d'énergie dépendant de la distance Terre-Soleil (définissant la zone habitable), l'inclinaison de l'axe de la Terre y installe un cycle annuel de saisons qui est important dans les régions polaires et plus discret dans les régions équatoriales.

- <u>Les grandes variations des caractéristiques de l'orbite terrestre</u>

Ces grandes variations modifient sensiblement les contraintes extérieures subies par la Terre et sont à l'origine de variations climatiques sur le long terme. Elles sont caractérisées par différentes périodicités. Leur conjonction est désignée sous le nom de « cycles de Milanković[4] ».

✓ *Variation de l'excentricité de l'orbite terrestre*. L'orbite terrestre n'est pas tout-à-fait circulaire. Selon la première loi de Kepler, elle est elliptique.
L'influence des autres planètes du système solaire ainsi que l'aplatissement du Soleil perturbent la forme de l'orbite terrestre en faisant varier, entre autres, son excentricité « e ». La valeur de cette excentricité peut aller de 0,005 à 0,058. Il en résulte que le rapport entre le flux d'énergie solaire

[4] Joseph-Alphonse Adhémar, James Croll et Milutin Milanković sont les principaux scientifiques ayant avancé l'idée que ces trois paramètres interviennent dans les variations climatiques naturelles, en particulier sur Terre. Cette hypothèse n'a été soutenue par des données expérimentales cohérentes qu'en 1976, avec l'article fondamental de Hays, John Imbrie et Shackleton.

maximal (lorsque la Terre se situe au périhélie[5]) et le flux minimal (lorsque la Terre se situe à l'aphélie[6]) varie de 2 % à 26 %. Actuellement, l'excentricité de l'orbite terrestre vaut 0,017 et le rapport précédent vaut 7 %. Ces variations résultent de la somme de trois composantes périodiques dont les périodes valent 413 000 ans, 120 000 ans et 95 000 ans.

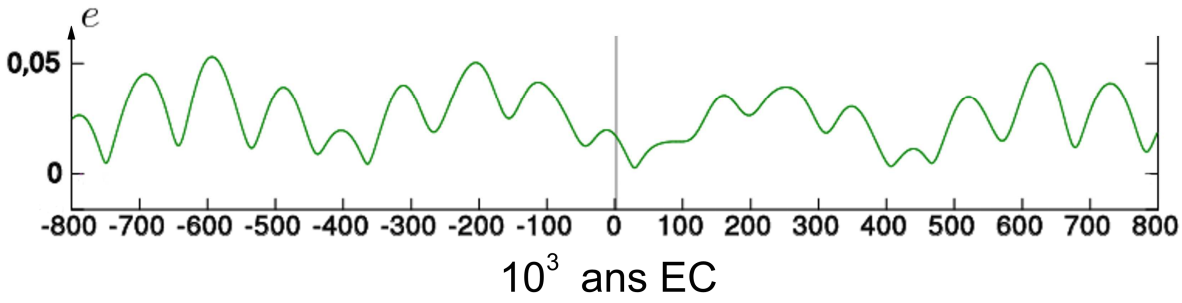


Figure 9 : *Variations de l'excentricité de l'orbite terrestre.*
Ces variations modifient l'amplitude des contrastes saisonniers.
Image : NASA - François Saint-Jalm (CEA).

✓ *La dérive du cycle des saisons par rapport au périhélie et à l'aphélie de l'orbite terrestre.* L'axe de rotation de la Terre décrit en 26 000 ans un cône : notre planète se comporte comme une toupie lancée sur le sol. Ce mouvement est appelé « précession des équinoxes » et a une périodicité de 26 000 ans.

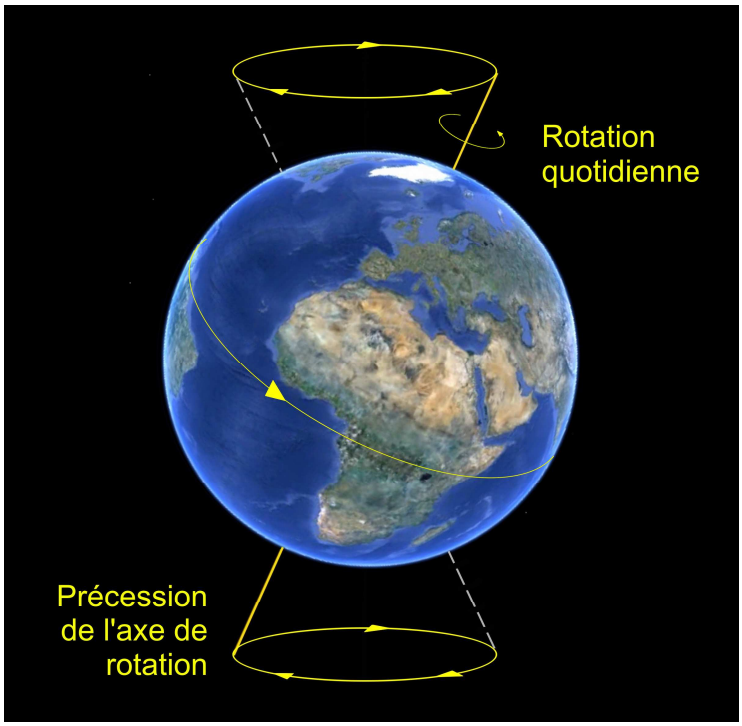


Figure 10 : *Mouvement de précession de l'axe de la Terre*
Image : François Saint-Jalm (CEA).

[5] Point de l'orbite terrestre où la Terre est la plus près du Soleil.
[6] Point de l'orbite terrestre où la Terre est la plus éloignée du Soleil.

Ce mouvement se conjugue avec la lente rotation du grand axe de l'orbite terrestre appelée « précession du périhélie ». Cette précession se fait en 112 000 ans à peu près. Il en résulte que la dérive des saisons le long de l'orbite terrestre a une périodicité de 21 100 ans.

Actuellement, la terre se trouve près de son périhélie (point le plus proche du Soleil) quand c'est l'hiver dans l'hémisphère Nord et l'été dans l'hémisphère Sud. Elle est près de son aphélie quand c'est l'été au Nord et l'hiver au Sud. Par conséquent l'amplitude des variations météorologiques saisonnières est modérée au Nord et amplifiée au Sud. Comme il y a plus de mers au Sud, cette amplification est en partie absorbée par l'inertie thermique de l'eau.

L'effet de cette double précession est représenté sur la Figure 11 :

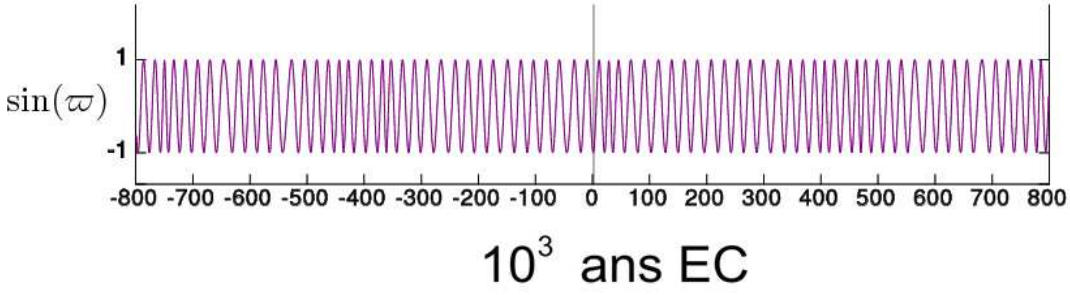


Figure 11 : *Effet de la précession sur la dérive des saisons le long de l'orbite terrestre.*
Elle se conjugue avec l'évolution de l'excentricité et joue également sur les contrastes saisonniers.
Image : NASA - François Saint-Jalm (CEA).

✓ L'effet conjugué de la variation de l'excentricité et des précessions est donné par la courbe suivante :

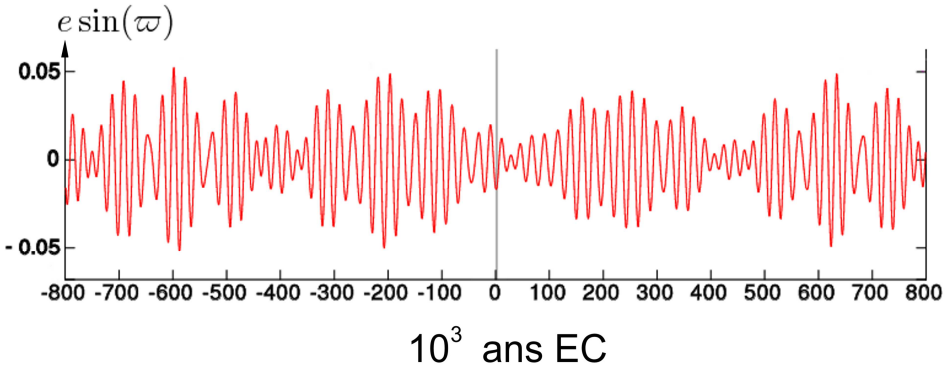


Figure 12 : *Effet conjugué de la précession et de la variation de l'excentricité.*
Image : NASA - François Saint-Jalm (CEA).

✓ Un autre effet peut être pris en compte : l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de l'écliptique varie un peu (entre 22,1° et 24,5°) avec une périodicité de l'ordre de 41 100 ans.

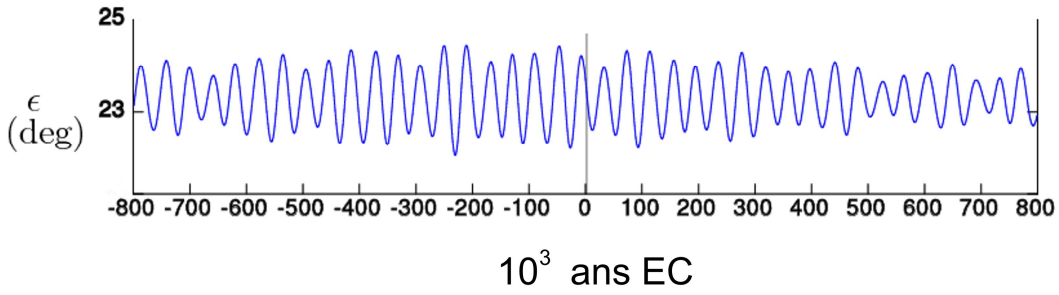


Figure 13 : *Variation de l'obliquité de l'axe de la Terre.*
Image : NASA - François Saint-Jalm (CEA).

On pourrait encore tenir compte des variations de l'activité solaire elle-même. Elles sont de deux types : la plus connue a une périodicité de 11 ans et est caractérisée par une variation du nombre de taches apparaissant à la surface du Soleil. Leur présence est liée au magnétisme solaire. Cette courte périodicité empêche ce phénomène d'avoir une grande influence sur le climat. En revanche, le Soleil grossit petit à petit au fur et à mesure qu'il évolue et le rayonnement que nous en recevons augmente progressivement quoique très lentement.

- Comparaison entre les variations des causes externes et les variations du paléoclimat.

On a indiqué, sur la figure 14, les variations de la puissance surfacique moyenne reçue du Soleil à 65° de latitude Nord et à 75° de latitude Sud. Cett e puissance est calculée en tenant compte des différentes influences qui viennent d'être citées. Les courbes qui suivent montrent successivement les variations isotopiques en deutérium de la glace extraite du forage EPICA (Dôme C Antarctique, noté EDC), la même mesure faite au forage de la station Vostok (Antarctique), la mesure des variations isotopiques de l'oxygène-18 dans les foraminifères qui ont sédimenté au fond des mers, variations directement liées à la température moyenne de l'océan dans lequel ils vivaient.

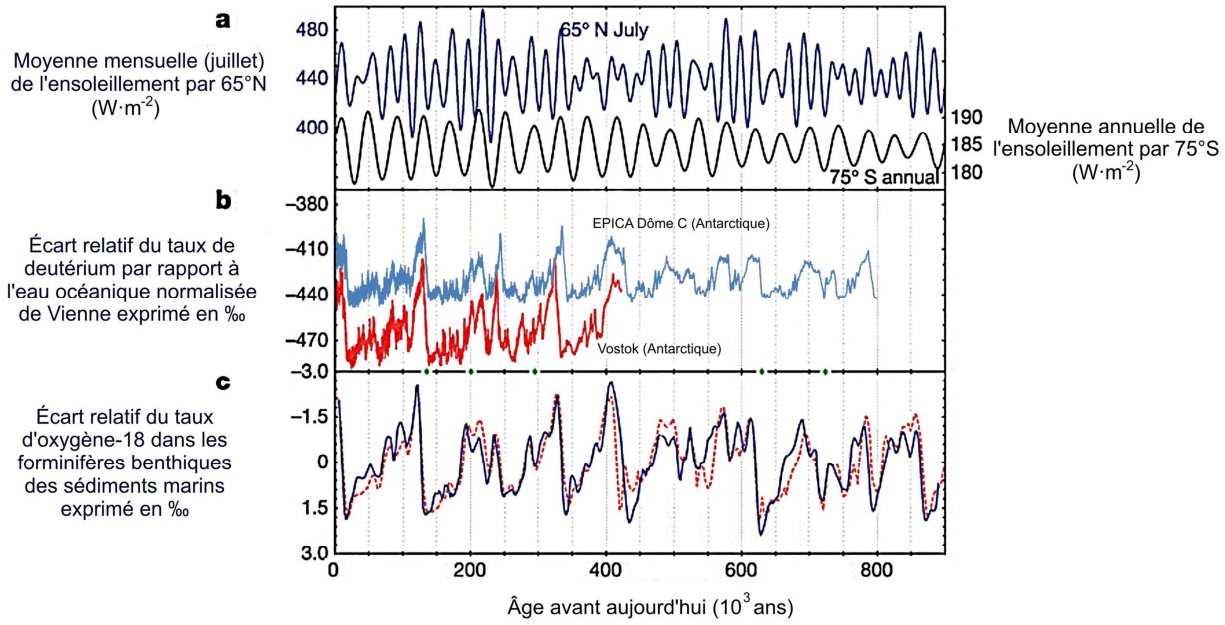


Figure 14 : *Comparaison entre les variations des principales causes extérieures et les variations de grandeurs liées à la température au cours des 800 derniers milliers d'années.*

Image: EPICA Community members, Revue Nature, n°429 , juin 2004.

Mise à jour à partir des données fournies par Jean Jouzel, Valérie Masson-Delmotte et al. 2007.

Image définitive : François saint-Jalm (CEA).

On remarque que si les deux courbes paléoclimatiques se ressemblent fortement, leur lien avec la puissance moyenne reçue du Soleil n'est pas flagrant. Par conséquent, on ne peut expliquer qu'une partie de l'évolution climatique du passé par ces seules causes externes.

- <u>Quelques causes internes de variation du climat</u>.

Si le climat moyen de la planète Terre est bel et bien conditionné par sa présence durable dans la zone habitable de son étoile, il est aussi fortement marqué par la composition chimique de son atmosphère. Celle-ci retient une partie de l'énergie qui la traverse et adopte une configuration d'équilibre caractérisée par ce qu'on appelle le climat moyen : c'est l'effet de serre.

Cet équilibre dépend de plusieurs facteurs qui interagissent les uns avec les autres.

✓ On peut citer **l'ensemble des mouvements atmosphériques** (vents, courants ascendants ou descendants) qui sont à la fois liés aux échanges thermiques que connaît l'atmosphère avec les océans et les terres émergées (et donc à la distribution des pressions qui en résulte) et à la rotation de la Terre sur elle-même. Cette circulation peut être perturbée par la présence (ou non) de terres émergées.

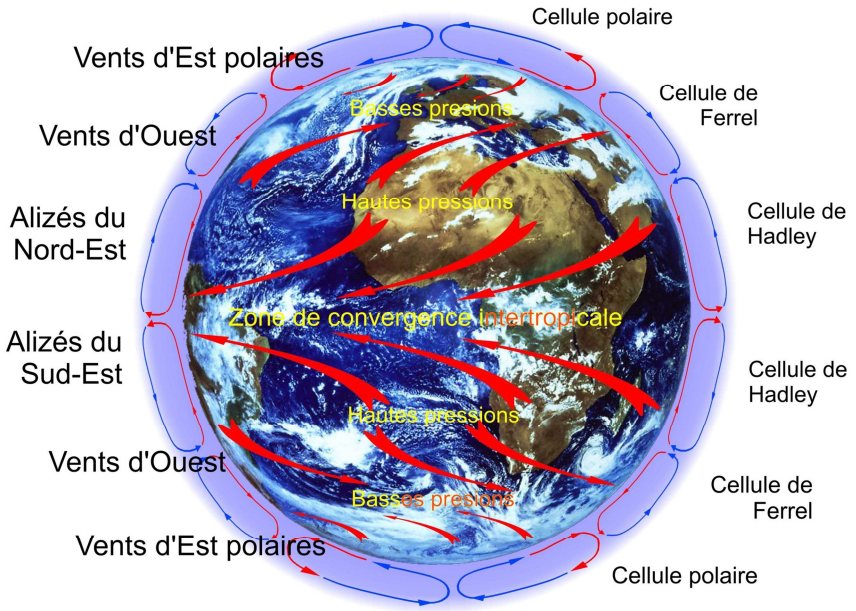


Figure 15 : *Vents dominants à basse altitude et circulation verticale de l'air.*
Image : François Saint-Jalm.

✓ **Les courants marins** jouent également un rôle déterminant dans la redistribution de l'énergie thermique à la surface du globe. La configuration actuelle des continents participe à la forte dissymétrie Nord – Sud entre les 40ème et 60ème parallèles. De plus, la plongée d'un courant dans les profondeurs ou sa remontée vers la surface dépend à la fois de sa salinité et de sa température par rapport aux eaux environnantes. C'est pourquoi la circulation des eaux des océans à l'échelle planétaire s'appelle la « circulation thermohaline ». Cette circulation est fortement impactée lors des grandes variations climatiques (périodes glaciaires et interglaciaires) par le relargage d'eau douce en mer ou au contraire sa captation dans les calottes polaires.

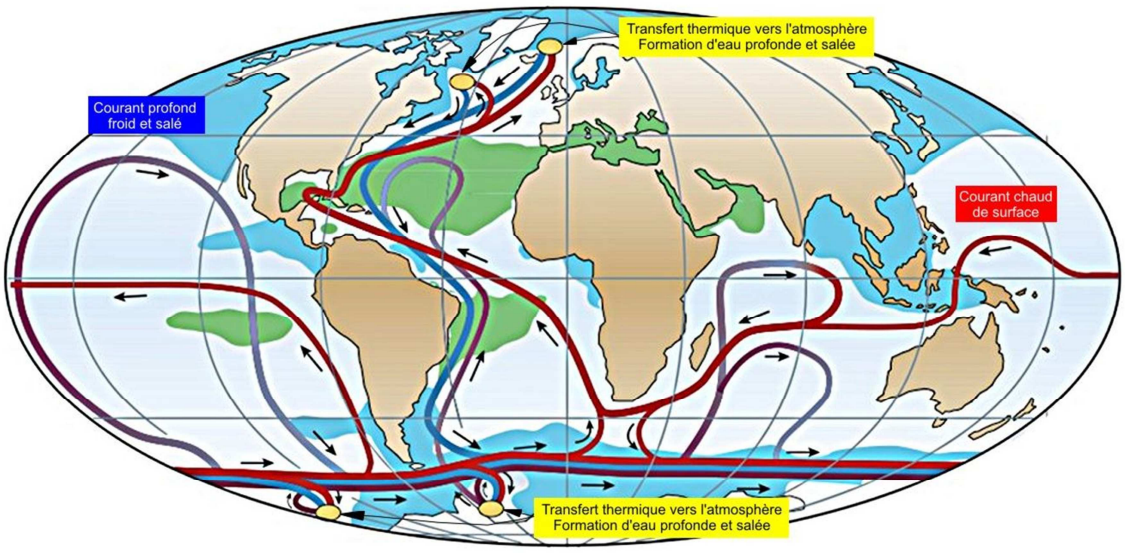


Figure 16 : *Circulation thermohaline*
Image : NASA. Légende : François Saint-Jalm (CEA).

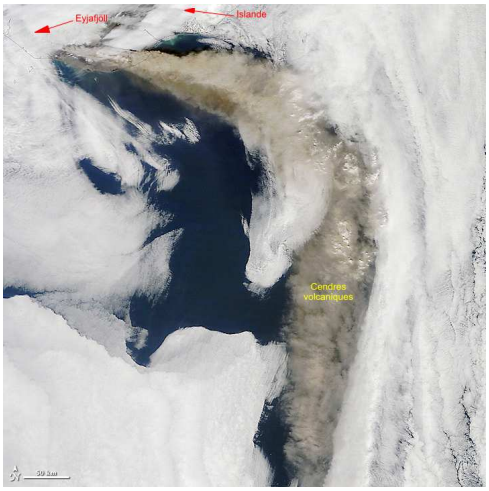
✓ L'atmosphère n'est pas seulement constituée de gaz dont la transparence aux rayonnements électromagnétiques dépend de la longueur d'onde : elle contient en suspension des gouttelettes d'eau et des cristaux de glace : c'est ce qu'on appelle la **couverture nuageuse**. Celle-ci a trois effets différents sur le climat.

- Elle réchauffe l'air ambiant lors de sa formation (liquéfaction ou condensation de vapeur d'eau).
- Elle renvoie vers l'espace une partie du rayonnement reçu du Soleil et est la composante principale de l'albédo terrestre.
- Elle renvoie vers le sol une partie du rayonnement infrarouge que celui-ci émet vers l'espace : c'est l'effet « couverture ».

Ces effets dépendent des types de nuages.

✓ L'atmosphère contient également en suspension des **aérosols** sous forme de gouttelettes ou de poussières d'origines variées. Leur effet sur le climat est assez complexe et dépend de leur nature. Ils peuvent renforcer l'albédo terrestre (→ refroidissement), ou inversement contribuer à l'effet couverture (→ réchauffement). Si les constituants sont chimiquement actifs, ils peuvent réagir avec certains gaz à effet de serre (comme l'ozone qui est très oxydant) et modifier de façon importante leur contribution à cet effet. De plus, des poussières solides en suspension peuvent avoir un effet refroidissant tant qu'elles sont en suspension, mais leurs dépôt sur des surfaces enneigées (glaciers, inlandsis, glace de mer) va diminuer l'albédo de la surface et favoriser leur fonte. Dans le cas de la glace de mer, sa surface va diminuer et l'albédo également. Il s'agit de ce qu'on appelle une rétroaction positive, qui a lieu de façon spectaculaire dans l'Océan Glacial Arctique.

La contribution des aérosols à l'effet de serre est l'un des plus difficiles à prendre en compte.



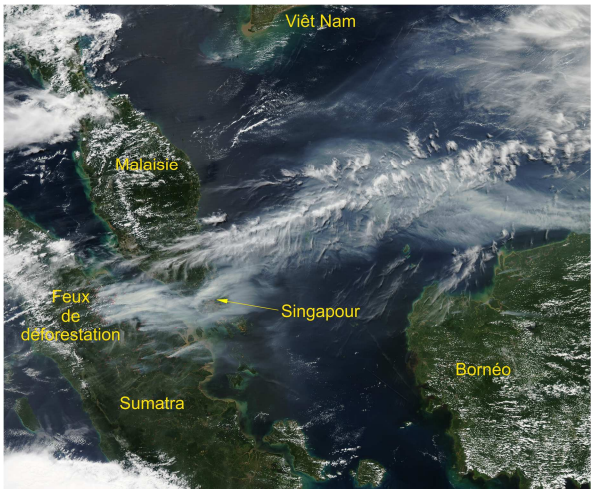


Figure 17 : *Éruption du volcan Eyjaflöll* ***Figure 18 :*** *Feux de déforestation à Sumatra*

Ces phénomènes dispersent des fines poussières dans l'atmosphère.
L'un est d'origine naturelle et l'autre est d'origine anthropique.
Images : NASA Earth Observatory.

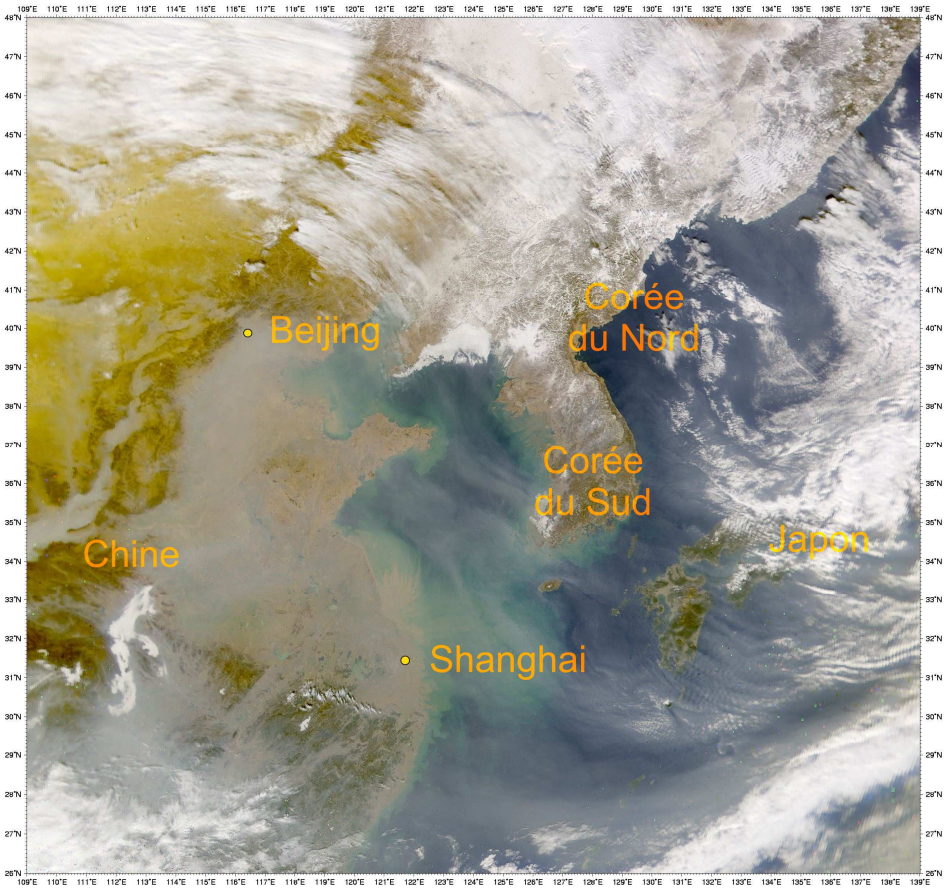


Figure 19 : *Le smog[7] au-dessus de la Chine orientale. Il est lié aux activités humaines. Image : Nasa Earth Observatory.*

- <u>Les variations climatiques</u>

Le climat de la Terre n'est pas stable : il connait des variations qui n'ont pas les mêmes temps caractéristiques.

Parmi ces variations climatiques, on peut citer le phénomène El Niño – Oscillation Australe (ENSO) dont la périodicité est inférieure à 10 ans et qui modifie le régime des vents, des pluies et des températures des eaux du pacifique.

Sur des périodes plus longues de l'ordre de quelques milliers d'années et durant les périodes glaciaires, il y a les événements de Dansgaard-Oeschger et Heinrich. Les événements D-O sont marqués par un rapide réchauffement de l'Atlantique Nord suivi par un lent refroidissement, puis par un refroidissement plus rapide et sont dus aux interactions entre l'atmosphère et les courants marins. Les événements de Heinrich font suite à une série d'événements D-O et impliquent en plus la dynamique des calottes polaires.

Enfin, sur des périodes supérieures à 100000 ans il y a les alternances de périodes glaciaires et interglaciaires.

[7] Le smog est le résultat de la condensation de l'eau (le *brouillard*) sur des poussières en suspension et de la présence d'ozone dans la troposphère.

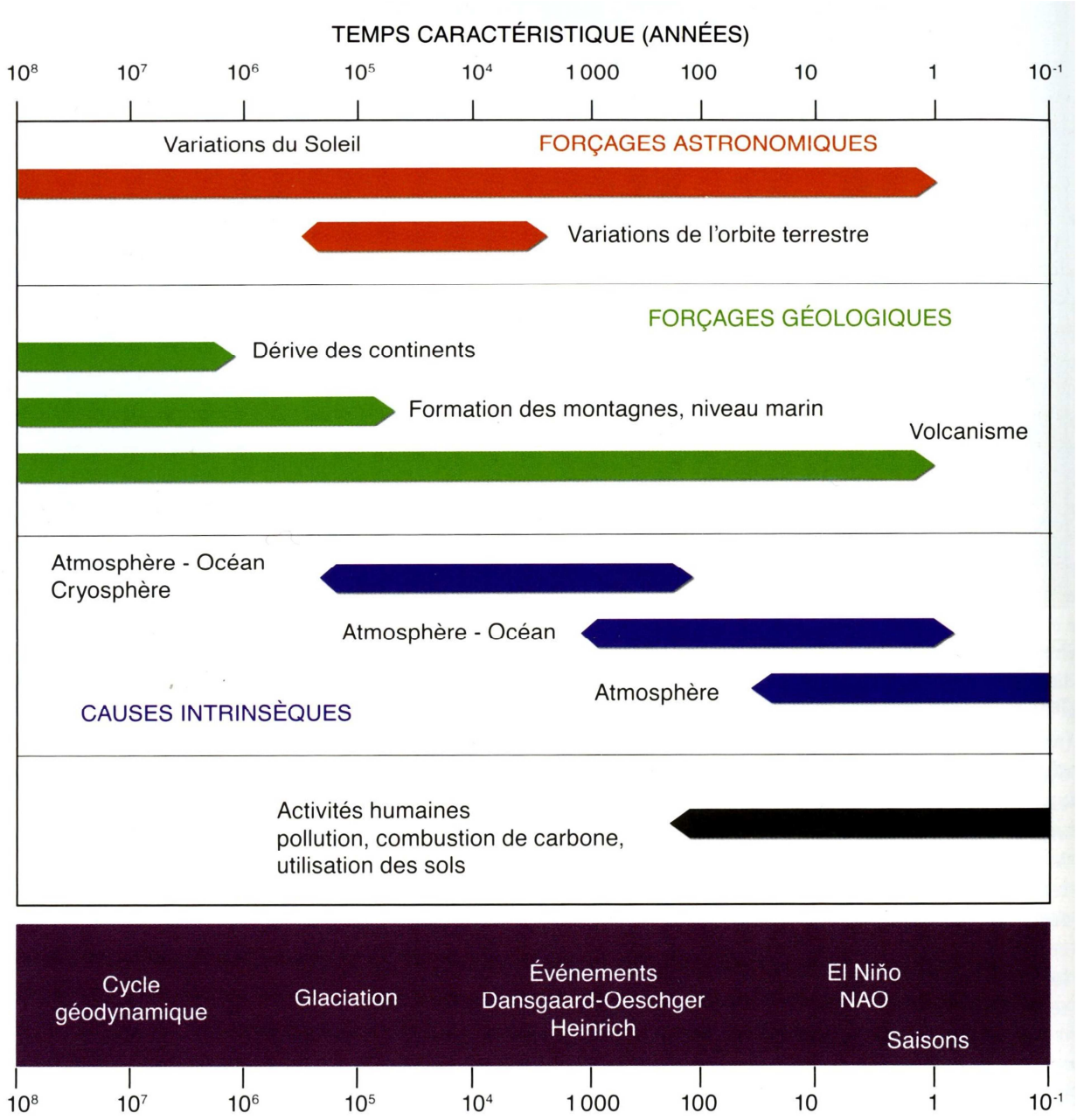


Figure 19 : *Schéma en échelle logarithmique présentant les principales causes de changements du climat ainsi que quelques exemples caractéristiques de fluctuations climatiques. En rouge et vert sont distingués les forçages externes au système climatique, en bleu les réarrangements internes au système et finalement en noir les effets anthropiques. Source : Brard, Leçon inaugurale du Collège de France, 2002.*
Image : « Le climat à découvert » ; CNRS Éditions.
Article de Sylvie Jousseaume (LSCE).

- Une thermodynamique et une mécanique hors équilibre

L'atmosphère est toujours en mouvement et les échanges thermiques n'atteignent jamais l'équilibre, situation où règnerait un calme plat. On ne se trouve pas non plus dans le cas où les flux de matière ou d'énergie thermique seraient réguliers et stationnaires. Localement, même dans des configurations simples, le système « atmosphère » est chaotique, c'est-à-dire « sensible aux conditions initiales » : une petite perturbation du système peut avoir des conséquences hors de

proportion (c'est ce qu'on appelle parfois « l'effet papillon »). De plus la machine climatique est extraordinairement complexe : le nombre de phénomènes différents et couplés qui déterminent l'évolution de ce système est très grand.



Figure 20 : *Allée de tourbillons de Von Karman causée par l'écoulement de l'air au voisinage de l'île Jan Mayen. C'est un phénomène lié à la turbulence de l'écoulement.*
Image : Nasa Earth Observatory.

- Les effets de seuil

L'une des caractéristiques de la dynamique du climat est l'existence d'effets de seuil. Par exemple, si la température moyenne de l'hémisphère Nord dépasse une certaine valeur, la banquise arctique ne va pas pouvoir regeler l'hiver autant qu'elle a fondu l'été précédent. La persistance de ce phénomène conduit à la diminution de sa surface et à l'accroissement de sa fragmentation. Par conséquent l'eau libre qui apparaît, réfléchissant moins le rayonnement solaire, va l'absorber et se réchauffer plus. Cela va favoriser la fonte de la glace et le phénomène va s'auto-entretenir. De tels effets de seuil existent aussi au sujet de l'interaction entre les conditions de survie d'une espèce et la modification des frontières climatiques modifiant le régime des pluies.

L'activité humaine

L'espèce humaine (Homo Sapiens) existe depuis à peu près 200 000 ans. On pense que la population humaine est passée par un « goulet d'étranglement » (environs 2 000 individus) il y a 140 000 ans[8].

La population humaine a commencé à augmenter significativement il y a environ 4 000 ans. En l'an 1 000, elle était d'environ 300 millions de personnes. Le seuil du milliard d'habitants a été

[8] Fulvio Cruciani et al., « A Revised Root for the Human Y Chromosomal Phylogenetic Tree: The Origin of Patrilineal Diversity in Africa », *The American Journal of Human Genetics*, vol. 88, n° 6, 19 mai 2011.

franchi en 1 800 et celui des 3,5 milliards en 1970. La population mondiale était de 7 milliards en 2011.

Globalement, l'activité humaine n'a pas eu une grande influence sur les processus climatiques jusque vers 1 800. L'apparition de la mécanisation et de l'utilisation de sources d'énergie comme le charbon et le pétrole il y a environ 200 ans constitue le point de départ d'une période où l'interaction entre les humains et le système climatique où ils sont apparus ne peut plus être négligée.

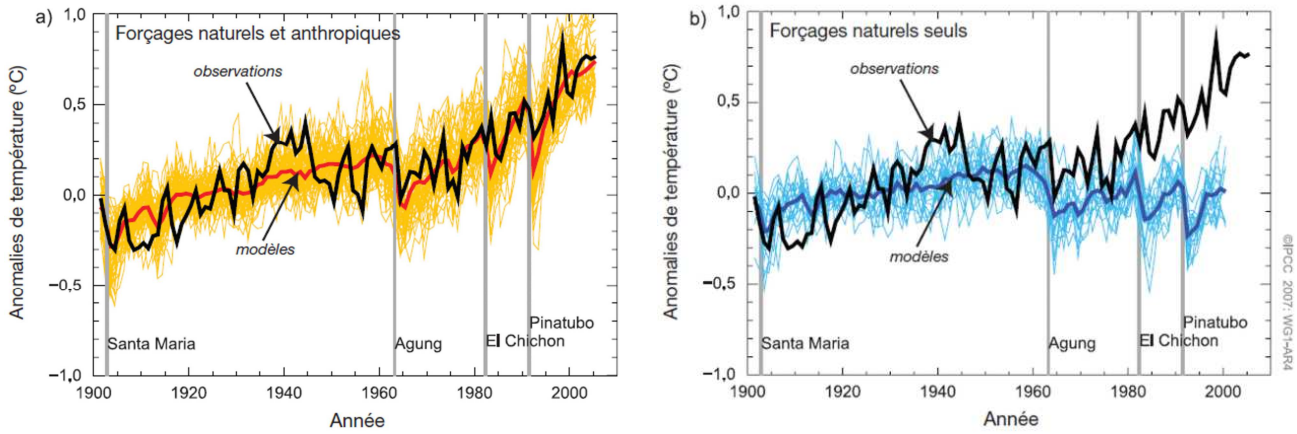


Figure 21 : *Courbes mettant en regard la température moyenne de la Terre avec des modèles tenant compte (ou non (à gauche)) de l'activité humaine. On note un décrochage vers 1 950.*
Image : Rapport du GIEC de 2007 (Résumé technique I, p. 64).

Même si les conséquences de l'activité humaine ne se limitent pas à des modifications climatiques détectables, la corrélation existant entre l'accumulation d'origine anthropique de gaz à effets de serre (GES) et l'évolution thermique de notre atmosphère ne peut plus être ignorée et est devenue un élément majeur de politique internationale. Les décisions actuellement prises (ou non) par les principales puissances (dominantes ou émergentes) de la planète auront des conséquences encore difficiles à estimer (voir à ce sujet le rapport 2013 du GIEC).

On peut cependant citer plusieurs phénomènes importants apparus dans les dernières décennies :

- L'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère.
- le dégel du pergélisol arctique qui provoquera un dégagement important de méthane (c'est un GES) dans l'atmosphère avec comme conséquence secondaire l'emballement du réchauffement, et la fonte plus ou moins avancée des glaces (glaces de mer et glaces terrestres).
- la fonte de la banquise arctique, déjà bien amorcée, facilite le réchauffement de l'océan qu'elle recouvrait auparavant.
- la fonte des glaces terrestres (inlandsis, glaciers) contribue à la montée du niveau de la mer, provoquant parfois la migration de nombreux humains.

- la montée du niveau moyen des océans, également due à sa dilatation par réchauffement.
- l'aridification de certaines régions (le pourtour méditerranéen par exemple).
- l'amplification de l'intensité de certains phénomènes naturels (comme le phénomène El Niño, les cyclones ou la Mousson).

Les modifications du climat global déplaceront également les « frontières climatiques » et contraindront les espèces vivantes, qu'elles soient animales ou végétales, élevées ou cultivées, à s'adapter en migrant vers les nouvelles zones qui leur conviennent. Certaines ne résisteront pas à ces brusques changements avec pour conséquence une baisse accrue de la biodiversité déjà soumise à d'autres formes de pression anthropique (pêche, occupation des sols, déforestation ...).

Les données météorologiques

Des mesures météorologiques ont été effectuées dès le XIII^{ème} siècle. À partir du milieu du XIX^{ème} siècle, on a commencé à standardiser les mesures et à les centraliser (Observatoire de Paris). Actuellement, de nombreuses stations de mesure de toutes natures fonctionnent et permettent de collecter en continu des données provenant de toute la surface terrestre. Ces mesures constituent la base à partir de laquelle les modèles de prévision peuvent initier leurs calculs.

Les archives climatiques

La compréhension des climats et des paléoclimats passe par la collecte d'un grand nombre de données et par la mise en évidence de traceurs climatiques fiables. On peut citer l'étude des cernes du bois que l'on peut dater grâce au carbone-14, l'étude des carottes glaciaires obtenues dans les forages effectués au Grønland ou en Antarctique, l'étude des forges des sédiments marins ou lacustres, l'étude des squelettes des coraux, l'études des concrétions calcaires que l'on trouve dans les grottes.

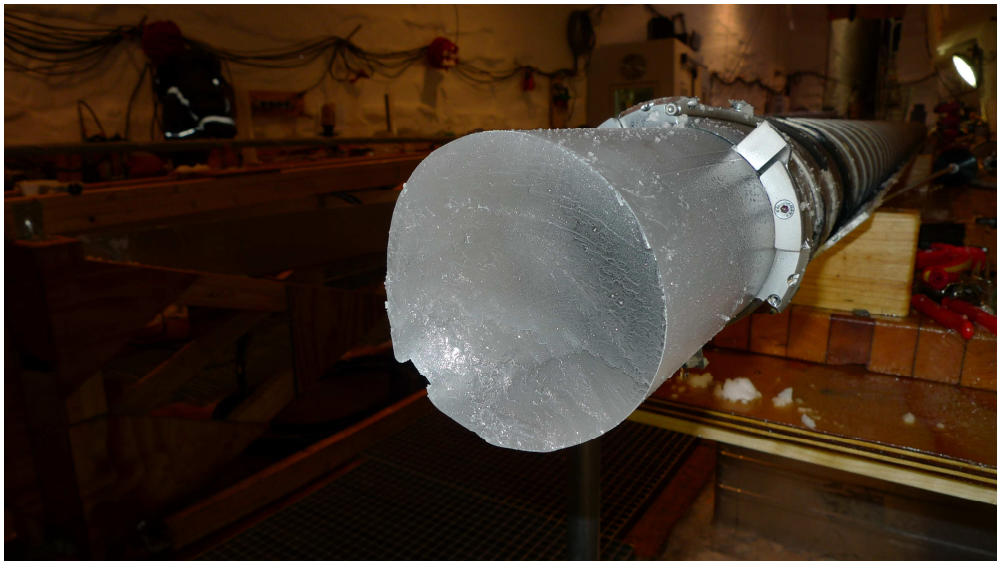


Figure 22 : *Carotte issue du forage NEEN du Nord Grønland*
Crédit : NEEM ice core drilling project, www.neem.ku.dk

La connaissance de l'évolution des climats sur le long terme permet de mieux comprendre la machine climatique en testant les modèles utilisés pour la prévision de l'évolution future.

ACTIVITÉS

Objectif

Le but de ce TP est de voir comment il est possible de tirer des informations quantitatives sur les paléoclimats à partir des carottes de glace prélevées dans les grands inlandsis tels que ceux du Grønland ou de l'Antarctique.

Les forages polaires

On lira avec profit l'article écrit par Valérie Masson-Delmotte dans la revue « Rayonnement du CNRS » et disponible à l'adresse : www.rayonnementducnrs.com/bulletin/b54/Masson.pdf.

Les glaces qui composent les grands inlandsis sont issues de l'accumulation progressive de neige. Celle-ci s'entasse et se transforme petit à petit en une glace qui renferme différentes impuretés (poussières d'origines diverses) ainsi que des bulles d'air qui y ont été piégées.

Depuis 1960, on a entrepris de prélever des carottes de glace en différents sites du Grønland et de l'Antarctique. On obtient pour chaque forage une longue série de cylindres de glace qu'il faut ensuite analyser en laboratoire. On procède à l'analyse isotopique en deutérium (^{2}H) et en oxygène 18 (^{18}O), à l'analyse de la composition de l'air contenu dans les microbulles emprisonnées dans la glace et à celle des différentes particules qu'on y trouve (Pollen, poussières d'origine volcanique, micrométéorites, etc…).

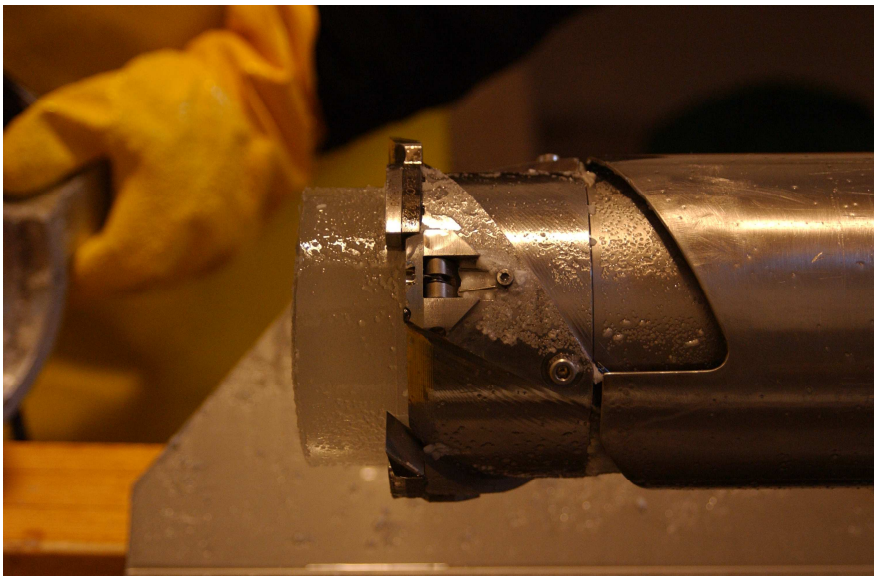


Figure 23 : *Exemple de carotte de glace extraite de l'inlandsis grønlandais.*
Image : NEEM ice core drilling project. http://www.neem.ku.dk.

Datation

Une étape importante consiste à dater les différentes strates des carottes. On utilise par exemple :

- Le comptage des couches ;
- La modélisation glaciologique ;
- L'utilisation de repères chronologiques et la corrélation avec d'autres enregistrements ;
- La comparaison aux variations d'ensoleillement liées aux paramètres orbitaux de la Terre.
- La datation absolue des poussières d'origine continentale ou volcanique incluses dans la glace.

Cette datation permet d'associer un âge à chaque profondeur de forage.

Détermination de la température du site de forage à l'époque de la formation de la glace.

L'eau de la planète Terre provient essentiellement des météorites de type « chondrite », qui ont bombardé notre planète depuis la formation du Système Solaire, et également de comètes. Elle s'est accumulée à partir du moment où la température terrestre a été assez faible pour que cette eau ne se décompose pas ou n'échappe pas à la gravitation à cause d'une agitation thermique trop importante (C'est l'hypothèse majoritairement retenue). Il en résulte que cette eau possède une composition isotopique précise : celle de l'eau des chondrites et des comètes (la question n'est en réalité pas encore tranchée). En effet, les molécules d'eau contiennent des atomes d'hydrogène et d'oxygène et parfois ces atomes sont les isotopes ^{2}H (autrement appelé le « deutérium ») et ^{18}O, plus rares que ^{1}H et ^{16}O qui sont majoritaires. Afin de pouvoir effectuer des comparaisons, on a défini une composition isotopique standard qui tient compte de toutes les petites variations observées dans les différentes parties du globe : il s'agit du V-SMOW ou Vienna Standart Mean Ocean Water. Ainsi, la composition isotopique de chaque couche de glace est comparée à ce V-SMOW en ce qui concerne le deutérium et l'oxygène-18.

On définit, pour chaque isotope, un « delta ». Par exemple, pour le deutérium, la définition du « delta » d'un échantillon est :

$$\delta D = \frac{\left(\frac{c(^{2}H)}{c(^{1}H)}\right)_{éch} - \left(\frac{c(^{2}H)}{c(^{1}H)}\right)_{V-SMOW}}{\left(\frac{c(^{2}H)}{c(^{1}H)}\right)_{V-SMOW}} \times 1000$$

Cette grandeur, qui est un écart relatif, s'exprime en « ‰ ».

La neige qui tombe sur un inlandsis provient d'une vapeur d'eau qui précipite sous forme solide après avoir voyagé avec des masses d'air provenant de latitudes moins élevées pendant plus ou moins longtemps. Une partie de cette vapeur a déjà été prélevée sous forme de précipitations

pendant ce voyage. Or, il se trouve, d'une part, que les molécules d'eau contenant un isotope lourd ont plus facilement tendance à rejoindre une phase condensée que leurs sœurs plus légères et, d'autre part, que ce processus est amplifié par une basse température. Ainsi, s'il fait plus froid, la vapeur qui parvient dans les régions polaires est plus appauvrie en deutérium et par conséquent son « delta » est plus petit (il est de toutes façons négatif).

Une évaluation de la relation existant entre ce « delta » et la température de précipitation a été préalablement effectuée en surface sur les différents inlandsis à l'endroit de chaque forage. Cela conduit à déterminer pour chaque site une droite d'étalonnage qui permet de calculer la température à laquelle l'eau présente dans chaque couche d'une carotte a précipité.

Analyse chimique des bulles d'air

Parallèlement à la datation et à l'estimation de la température du site de forage aux différentes époques, il est possible d'analyser l'air des bulles que renferme la glace des carottes et d'en tirer une information sur la composition de l'atmosphère terrestre à chaque date. En effet, cette glace n'est pas de l'eau qui a gelé, mais de la neige qui s'est tassée. Après une phase où l'air peut diffuser entre les particules de neige, celles-ci se soudent progressivement les unes aux autres et emprisonnent finalement l'air.

On prélève donc des fragments de carotte correspondant à une date donnée, et on dépiège les bulles par fusion et aspiration. Diverses méthodes d'analyse sont ensuite mises en œuvre pour « faire parler » le plus possible l'échantillon. On mesure par exemple le rapport O_2/N_2, et la concentration en différents gaz comme les gaz à effet de serre (CO_2 ou CH_4).

Étude du forage effectué au Dôme C

Pour les données relatives aux températures, nous utiliserons ici les travaux effectués au Dôme C par la mission EPICA (EPICA Dome C Ice Core 800kYr Deuterium Data and Temperature Estimate) dont les principaux contributeurs sont : J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J.M. Barnola, J. Chappelaz, H. Fischer, J.C. Gallet, S. Johnsen, M. Leuenberger, L. Loulergue, D. Luethi, H. Oerter, F. Parrenin, G. Raisbeck, D. Raynaud, A. Schilt, J. Schwander, E. Selmo, R. Souchez, R. Spahni, B. Stauffer, J.P. Steffensen, B. Stenni, T.F. Stocker, J.L. Tison, M. Werner et E.W. Wolff.

En ce qui concerne les données relatives à la concentration en CO_2, nous utiliserons la compilation des mesures faites par les équipes suivantes :

De 0 à 22000 ans : Monin et al. (Université de Berne).

De 22000 à 393000 ans : Petit et al, Pépin et al, Raynaud et al. (LGGE de Grenoble).

De 393000 à 416000 ans : Siegenthaler et al. (LGGE de Grenoble).

De 416000 à 664000 ans : Siegenthaler et al. (Université de Berne).

De 664000 à 800000 ans : Luethi et al. (Université de Berne).

On les trouve sur :

ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antartica/epica_domec/edc-co2-2008.txt.

■ **Activité 1:** Localisation.

- Déterminer, grâce à une recherche sur Internet, la localisation du Dôme C. Trouver ses latitude, longitude et altitude.

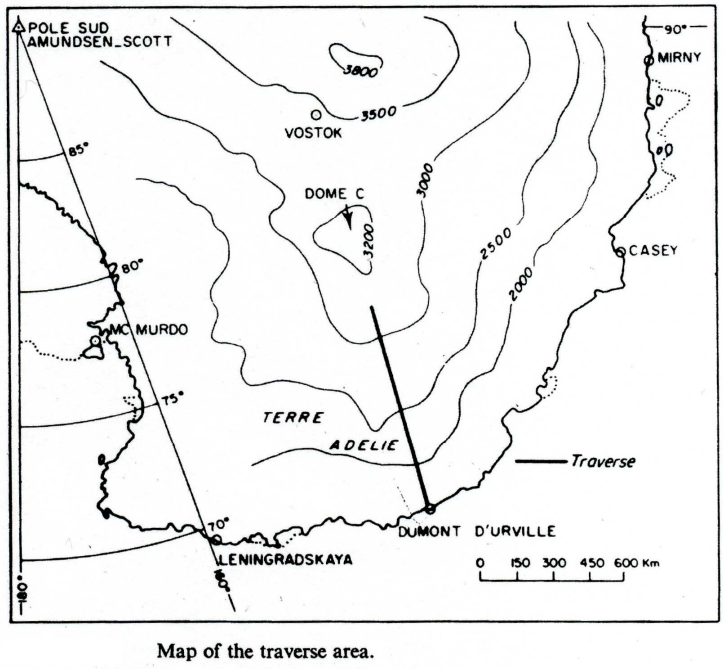
■ **Acitvité 2 :** Relation profondeur – âge.

Cette relation n'est pas simple. Elle a pour nom EDC-3 et on en trouve une description sur www.clim-past.net/3/485/2007/cp-3-485-2007.pdf . Elle s'exprime en « années avant 1950 ».

- Ouvrir le fichier Excel « TP Études paléoclimatiques - nouveau ». À partir des données figurant sur la feuille « Âge, profondeur et deutérium », tracer la courbe « Âge = f(profondeur) » (Courbe 1). Remarque : pour sélectionner toutes les cellules (il y a environ 5 800 lignes !), sélectionner les deux cellules de la première ligne et agir sur « ctrl-maj-↓ ».
- Que peut-on dire de cette courbe ?
- Comment expliquer sa forme ?

■ **Activité 3 :** Relation δD – température.

Cette relation a été établie grâce aux travaux de Claude Lorius et Liliane Merlivat au début des années 70. Des échantillons de glace ont été collectés le long d'une ligne reliant la station Dumont d'Urville au Dôme C. La température moyenne de chaque lieu a été reliée au δD. Ces résultats sont portés sur la feuille « Données température ».



Map of the traverse area.

Figure 24 : *Trajet le long duquel les relevés de température et de δD ont été effectués.*
Image : Claude Lorius, Liliane Merlivat.

- Tracer la courbe $\delta D = f(T)$ (Courbe 2) en mode « nuage de points » non reliés entre eux.
- Distinguer deux groupes de points qui semblent appartenir à deux séries relevant de deux logiques différentes.
- Reprendre le tracé de la courbe (Courbe 2 bis) en distinguant les deux séries de données pour obtenir deux groupes de points de couleurs différentes.
- L'une des deux séries montre un alignement approximatif. Tracer la courbe de régression linéaire et en donner l'équation cartésienne.

  Pour cela, effectuer un clic droit sur un des points de la série et cliquer sur « ajouter une courbe de tendance ». Puis choisir l'option « linéaire » et cocher la case « afficher l'équation ».

■ **Activité 4 :** Calcul des températures (Dôme C)

- Revenir sur la feuille « Âge, profondeur et deutérium ». Utiliser maintenant les données « δD » et la relation trouvée lors de l'activité précédente pour calculer la température moyenne annuelle T qui était celle des différentes tranches du forage du Dôme C lorsqu'elles se sont formées.
- Calculer maintenant pour chaque couche l'écart $\Delta T = T - T_{moy}$ entre la température T calculée ci-dessus et la moyenne T_{moy} régnant au Dôme C en 2007 en prenant : $T_{moy} = -57{,}17°C$.

■ **Activité 5 :** Relation âge – ΔT.

- Tracer maintenant la courbe $\delta T = f(\text{âge})$ (Courbe 3).
- Qu'observe-t-on ?
- Tracer la courbe (Courbe 4) correspondant à l'Holocène (0 – 11 700 ans).
- Que peut-on remarquer ?

■ **Activité 6 :** Corrélation entre température et concentration en CO_2

- Reproduire la courbe 3 et superposer sur ce nouveau graphique la courbe $c(CO_2) = f(\text{âge})$ (Courbe 5). Sélectionner l'une des séries de façon à mettre en place un axe vertical secondaire et ajuster les échelles de façon à pourvoir superposer les deux courbes.
- Que peut-on en conclure ?

www.cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Direction de la Communication | Service Editions - Evènements
91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 16 09

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019