

## Variations passées, récentes et futures du climat

Introduction :

Nous l'avons vu, le climat est un système complexe qui tient compte de nombreux paramètres atmosphériques. Les climatologues cherchent notamment à étudier les variations climatiques dans le temps, car si la température moyenne sur Terre est relativement stable actuellement, le climat a subi des variations naturelles cycliques.

Ainsi, il convient de mieux appréhender le climat passé afin de comprendre le climat présent et d'être en mesure de percevoir le climat futur de notre planète.

Dans un premier temps, des marqueurs biogéochimiques vont permettre de mettre en lumière des variations climatiques passées. Puis, nous étudierons les causes externes et internes de la variabilité naturelle du climat ainsi que les rétroactions existantes et le rôle particulier des océans.

### 1 Étudier le climat passé : les indicateurs d'un changement climatique

Le climat du passé peut être reconstitué grâce à des **marqueurs chimiques ou biologiques** enregistrés dans les glaces ou les sédiments.

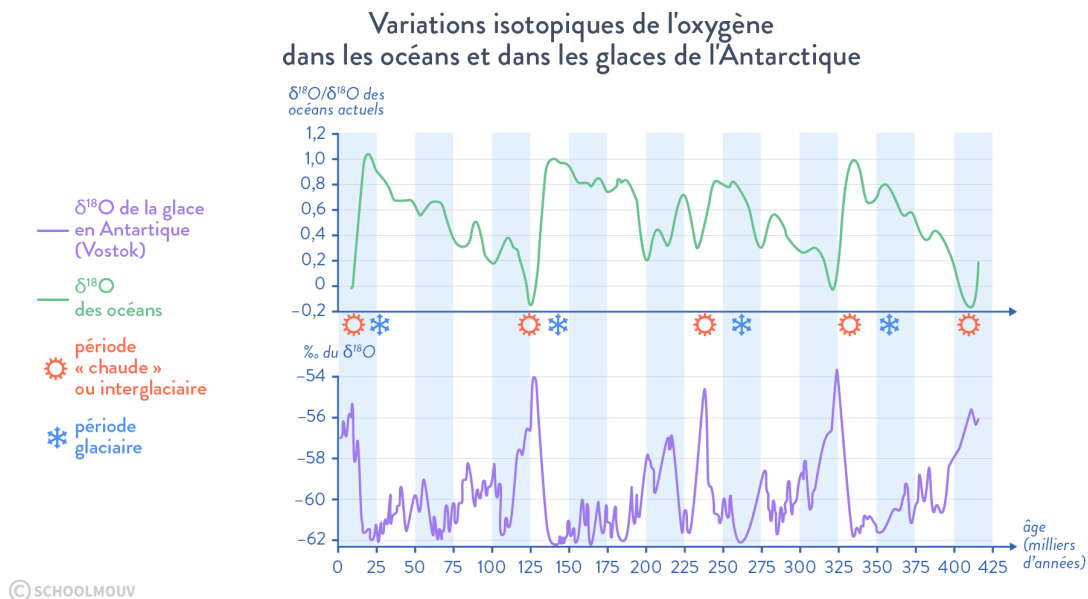
a. L'analyse du delta de l'oxygène 18 ( $\delta^{18}\text{O}$ )



Nous avons vu dans [le cours précédent](#) que les changements de températures peuvent être appréhendés à l'aide du  $\delta^{18}\text{O}$  **des glaces et des foraminifères** (micro-organismes marins), en complément de l'analyse des poussières contenue dans les couches de glace successives pour la datation.

→ Le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces permet de calculer le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans, car il y est directement relié par un **bilan de masse totale des isotopes de l'oxygène**.

En effet, les scientifiques considèrent que la quantité d'atome d'oxygène est identique à travers les âges. Si la quantité d'oxygène 18 est moindre dans les glaces, alors la quantité dans les foraminifères et donc dans les océans sera plus importante.



Sur ce graphique, on peut remarquer deux choses :

- il y a une **anti-corrélation forte entre le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans et le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces du pôle sud** : le  $\delta^{18}\text{O}$  des océans devient négatif ou nul en période chaude, tandis que le  $\delta^{18}\text{O}$  de la glace devient moins négatif ;
- chaque période chaude est suivie dans les 20 milliers d'années par une période glaciaire qui dure environ 75 milliers d'années : on peut donc parler de **variations cycliques**.

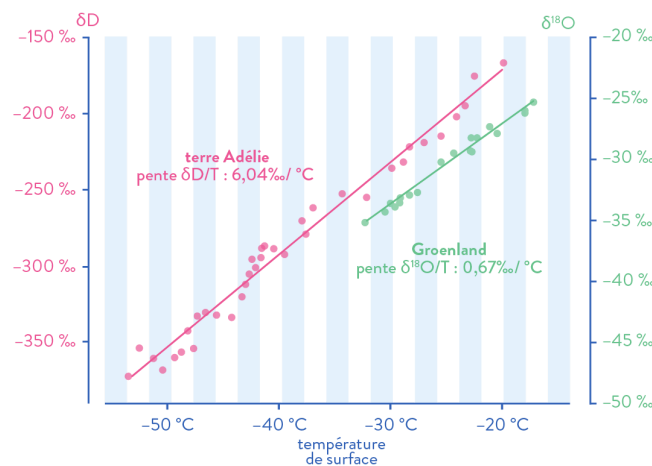
Pour passer des variations des isotopes d'oxygène à des températures, les scientifiques ont créé un étalonnage grâce au  $\delta^{18}\text{O}$  pris au Groenland et au  $\delta\text{D}$  pris en terre Adélie (Antarctique).

Le  $\delta\text{D}$  correspond à la variation des isotopes en hydrogène dans la molécule d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Ce paramètre est construit comme le  $\delta^{18}\text{O}$  et représente donc les mêmes variations dans l'eau (glace, océans). Le choix du  $\delta^{18}\text{O}$  ou

du  $\delta D$  tient aux équipements de laboratoire mais ne change donc rien sur le fonctionnement du fractionnement isotopique.

→ Les  $\delta^{18}O$  et  $\delta D$  conjugués à la connaissance actuelle du fractionnement isotopique de la formation de la neige ont permis de créer un **thermomètre isotopique**.

Thermomètre isotopique montrant la relation entre le  $\delta^{18}O$  ou le  $\delta D$  et la température de surface au niveau des pôles



© SCHOOLMOUV

Source : © Jouzel et al., 1994

→ Le décalage observé tient au fait que le pôle Sud est un continent subissant peu de saisonnalité dans ses précipitations, contrairement au pôle Nord. Les précipitations se sont accrues notamment au moment du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, constituant une importante calotte glaciaire sur l'Amérique du Nord dans un contexte de fort refroidissement.

## b. La palynologie

Un autre paramètre est utilisé par les paléo-climatologues : les **pollens**. Les plantes sont devenues terrestres il y a environ 430 millions d'années. Les Spermatophytes (conifères) et les Angiospermes (plantes à fleurs) sont apparus il y a 350 et 245 millions d'années. Il est ainsi possible de trouver des pollens fossilisés dans des sédiments de ces époques.

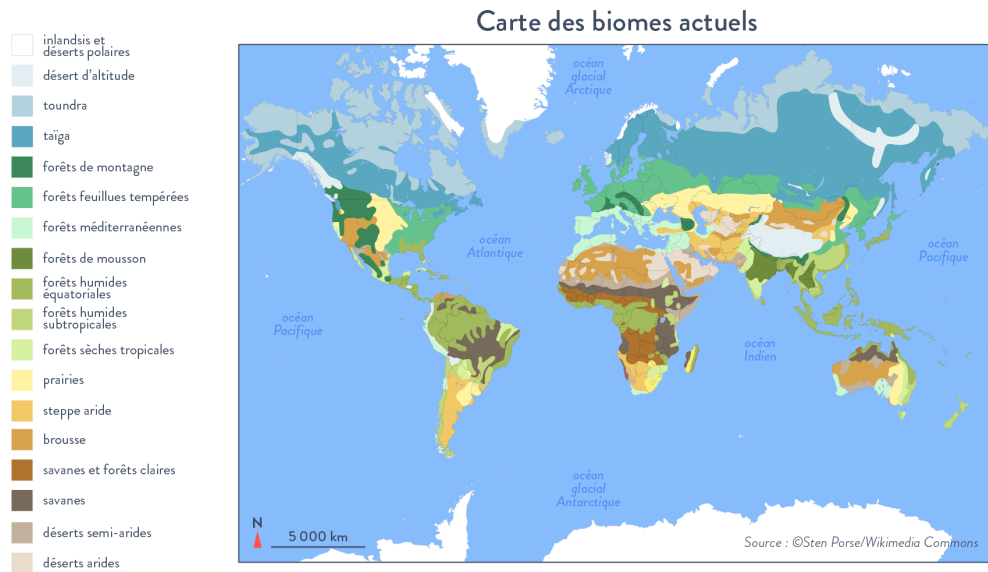
→ La **palynologie** (étude des pollens) nous permet d'accéder au climat à partir du Miocène (23 Ma), car les taxons présents sont proches de nos genres,

familles ou espèces actuelles.

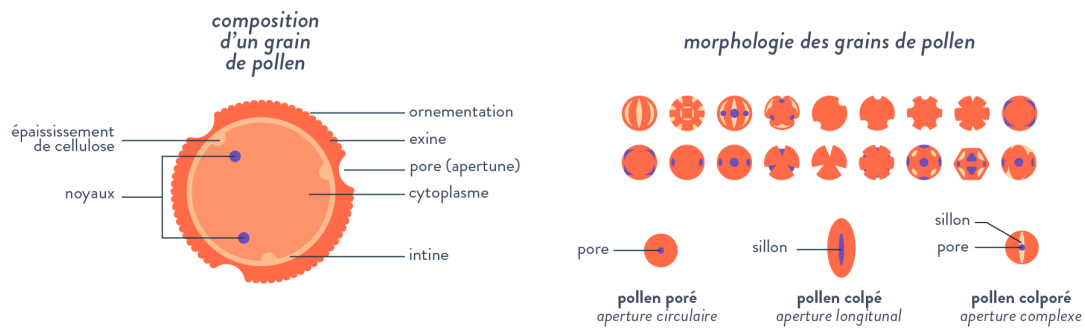
Il est donc aisé d'extrapoler nos connaissances sur les biomes actuels à ceux du passé (on parle d'actualisme).



Un biome est une vaste étendue terrestre définie par une cohérence bioclimatique, caractérisée par sa faune, sa flore et son climat.



La morphologie d'un grain de pollen est propre à chaque famille ou genre, plus rarement à une espèce.



© SCHOOLMOUV

La paroi des grains de pollens, constituée de molécules résistantes, se conserve extrêmement bien dans le temps.  
De plus, elle porte des **ornementations**, des **sillons** ou est ponctuée de **pores**. Ces informations morphologiques sont déterminantes pour retrouver le genre à l'aide d'une clé d'identification.



## 1 Composition d'un échantillon

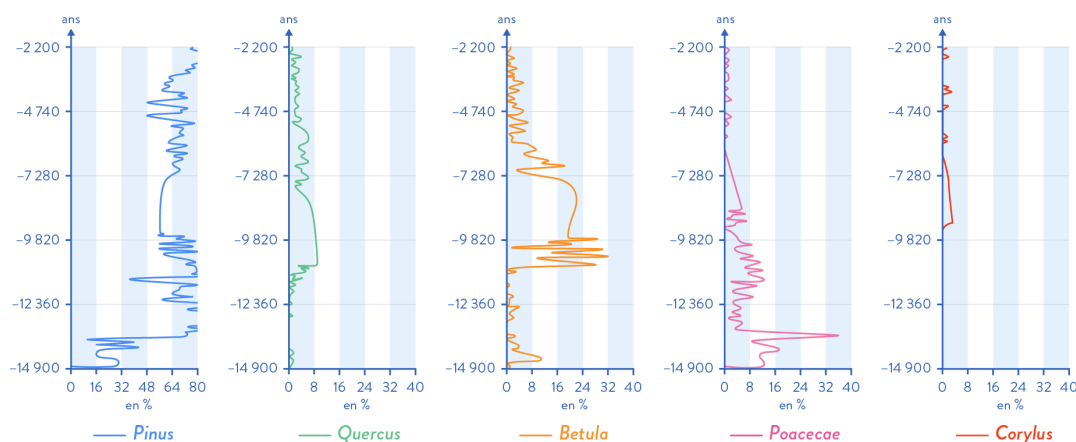
À l'aide du logiciel Paléobiomes, on peut sélectionner le site de Freissinière (Col des Lauzès, à **1 784 m** d'altitude, dans la région alpine. On y trouve les données brutes des quantités de pollen en fonction de la profondeur dans la tourbière et leur datation associée, entre **2 282 ans BP** et **14 886 ans BP** (BP = *Before Present*, c'est-à-dire, avant aujourd'hui).

On fait le choix de sélectionner les données des genres *Poaceae* (graminée), *Quercus* (chêne), *Pinus* (pin), *Betula* (bouleau) et *Corylus* (noisetier), caractéristiques de certains climats.

## 2 Création des diagrammes polliniques

Le logiciel va automatiquement créer les diagrammes polliniques associés sur l'ensemble des données sélectionnées.

### Diagramme pollinique pour le site de la Freissinière



© SCHOOLMOUV

On obtient ainsi le pourcentage de présence de chaque type de pollen en fonction des années sur la période donnée.

### 3 Détermination des variations climatiques d'un lieu

<b>Poaceae</b>	climat froid et sec
<b>Betula</b>	climat froid à tempéré humide
<b>Pinus</b>	climat froid à tempéré sec
<b>Quercus</b>	climat tempéré à chaud
<b>Corylus</b>	climat tempéré à chaud humide

*Pinus* est un genre peu indicatif en altitude, car largement prédominant quelle que soit la variation climatique.

Entre **2 200 ans BP** et **7 400 ans BP**, il y a présence de *Quercus* et *Betula* en plus de *Pinus*. Cela est un indicateur d'un climat tempéré pour le chêne, mais humide pour le bouleau.

Puis, sur la période, **7 400 ans BP** à **9 300 ans BP**, on a une prédominance de *Betula* et 3 % de *Corylus*, tous deux marqueurs d'humidité dans le climat.

Enfin, de **9 300 ans BP** à **14 900 ans BP**, les *Poaceae* deviennent plus présentes, marquant un climat plus froid et sec.

- Le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces est un paramètre qui a une valeur moins négative lors d'une période interglaciaire et très négative lors d'une période glaciaire. Le  $\delta^{18}\text{O}$  des glaces et celui des océans sont anti-corrélés. À l'aide d'un paléothermomètre isotopique, on peut reconstituer la température et donc le climat qui régnait sur la Terre.
- La température et la pluviométrie sont des paramètres climatiques déterminants dans le développement d'une plante. L'analyse des dépôts de pollen est donc révélatrice des assemblages de végétaux se développant à une période donnée. Par exemple, les *Poaceae* sont typiques des climats froids et secs, comme les steppes sibériennes actuelles.

Maintenant que nous avons vu comment les variations passées du climat peuvent être observées, nous allons nous intéresser aux causes des variations climatiques de manière générale.

## 2 | Les causes astronomiques de la variabilité naturelle du climat

Les variations climatiques peuvent avoir une cause d'origine externe à la Terre.

Ces causes externes de la variabilité naturelle du climat sont caractérisées par de **grandes amplitudes**, que ce soit sur l'échelle spatiale, en touchant des continents entiers, voire le globe terrestre dans son intégralité, ou sur l'échelle temporelle, en s'exprimant sur de larges périodes de temps (milliers à millions d'années).

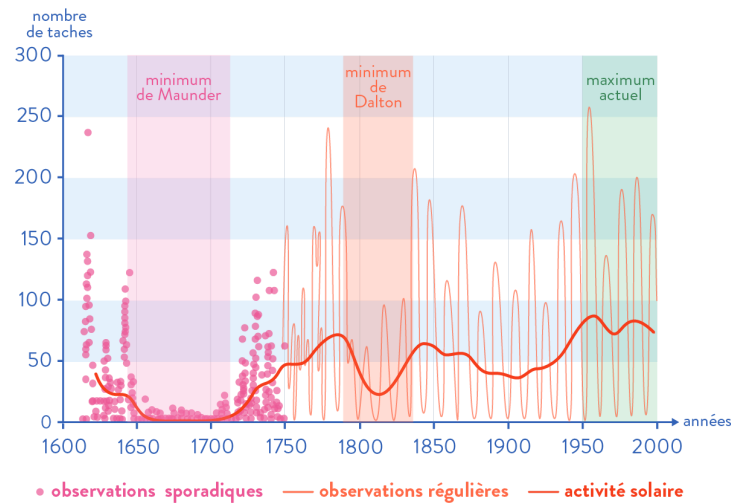


### a. L'activité solaire

Historiquement, la première cause des variations climatiques qui a été répertoriée est l'**activité solaire**, vers 1610.

Le Soleil a une périodicité d'activité de 11 ans. Lorsqu'il présente de nombreuses taches solaires, son rayonnement est plus intense et la Terre reçoit  $0,2 \text{ W/m}^2$  en plus pendant cette période.

### Observation du nombre de taches solaires par an



© SCHOOLMOUV

Source : ©Sémhur/Wikimedia Commons

→ Le **minimum de Maunder** correspond à une très faible quantité de taches solaires entre 1645 et 1715. Il est bien corrélé avec le Petit Âge glaciaire, période de refroidissement en Europe entre le XVII<sup>e</sup> siècle et le XVIII<sup>e</sup> siècle. Le Soleil aurait perdu entre 0,2 % et 0,3 % de sa luminosité totale durant cette période. Il en va de même pour le **minimum de Dalton** : le nombre de tâches solaires moins important correspond à une période climatique plus froide.



Attention

Deux précautions dans la lecture de ces informations doivent être mise en avant : les observations ne sont régulières que depuis 270 ans et ce ne sont que des observations.

La démarche scientifique n'a pas prouvé le lien de cause à effet entre le nombre de taches solaires et les variations climatiques. Il s'agit juste d'une correspondance, intéressante d'un point de vue historique. Cela met en perspective les causes des variations climatiques et montre que les climatologues n'ont pas encore saisi toute la complexité du système climatique.

En outre, le rayonnement solaire agit sur la **formation du carbone 14** dans l'atmosphère. Plus l'intensité du rayonnement solaire est importante et moins il y a production de carbone 14.

En combinant les connaissances actuelles sur ce phénomène avec la dendrochronologie (étude des cernes des arbres), on est capable d'estimer



l'activité antérieure du Soleil.

Cela nous amène à la corrélation inverse qui existe entre la périodicité solaire et la variation des températures atmosphériques avant l'ère postindustrielle.

Mais actuellement l'activité solaire augmente, les taux de  $\text{CO}_2$  et la température aussi. Ce paramètre solaire est donc à considérer avec prudence. Il semble jouer de manière indirect et complexe sur le climat.



## La théorie de Milankovitch

Au XIX<sup>e</sup> siècle, les géologues découvrent le lien entre les variations de l'énergie solaire (ou insolation) et les périodes de glaciation.

→ C'est **Milutin Milankovitch**, à partir de 1911, qui va formaliser la **théorie astronomique des paléoclimats**.



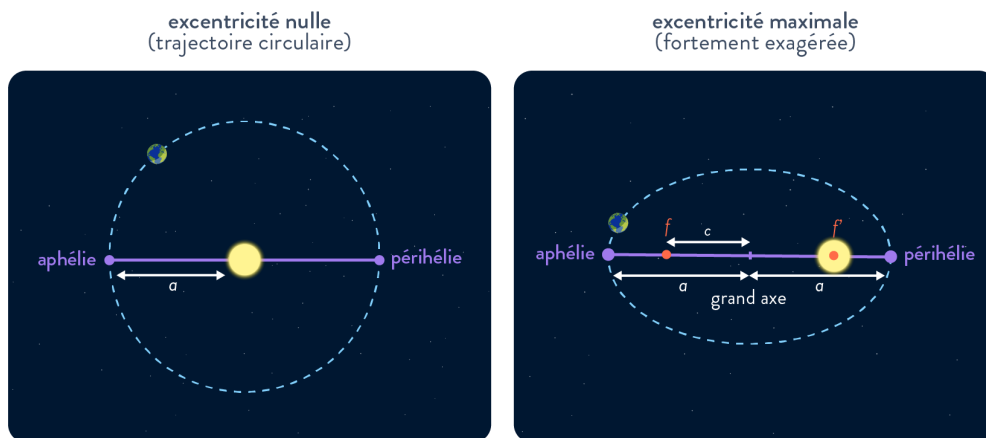
La théorie des cycles de Milankovitch consiste à attribuer l'alternance des âges glaciaires et interglaciaires aux **variations des paramètres orbitaux de la Terre**. Ces trois paramètres sont :

- l'**excentricité de l'orbite terrestre** ;
- l'**obliquité de l'axe de rotation de la Terre** ;
- la **précession des équinoxes** (changement de sens de l'axe de rotation terrestre).

Voyons plus en détail la variation de ces paramètres.

### 1 Variation de l'excentricité de l'orbite terrestre

L'orbite terrestre est une ellipse dont l'un des foyers ( $F$  ou  $F'$ ) est occupé par le Soleil. En réalité, la taille du grand axe de cette ellipse (son plus grand diamètre) et donc de l'orbite terrestre varie entre un cercle et une ellipse.



© SCHOOLMOUV

- L'excentricité de l'orbite terrestre  $e$  est égale au rapport de la distance focale  $c$  ( $OF$  ou  $OF'$ ) sur le demi grand axe  $a$ , soit  $e = \frac{c}{a}$ . Lorsque l'orbite décrit un cercle,  $e = 0$ .
- La Terre au **périhélie** reçoit une intensité solaire maximale. Au contraire, à l'**aphélie**, la Terre reçoit une énergie solaire moindre.

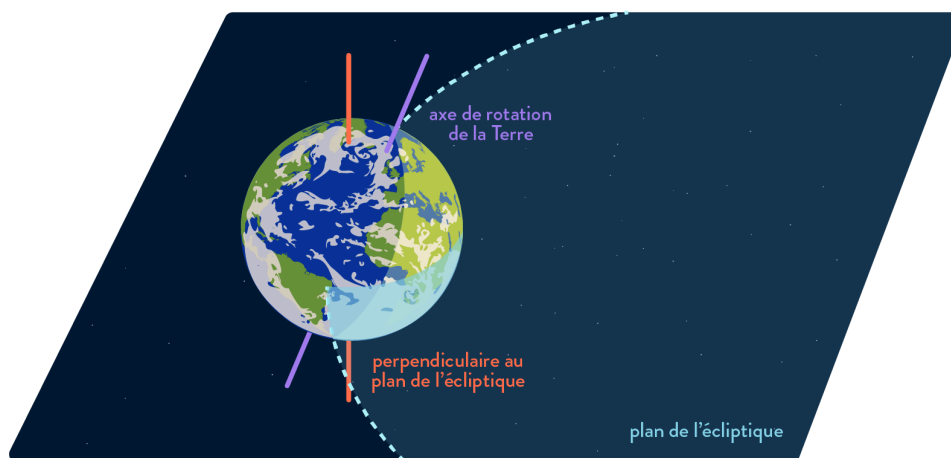
L'excentricité de l'orbite terrestre varie sur une période de plus de 400 000 ans.

## 2 Variation de l'obliquité de l'axe de rotation

L'axe de rotation de la Terre forme un angle  $\varepsilon$  par rapport à l'axe perpendiculaire au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). Cet angle varie entre  $21,9^\circ$  et  $24,5^\circ$  sur une période d'environ 41 000 ans.

- Plus l'angle est important, plus les saisons sont marquées.

## Obliquité de l'axe de rotation de la Terre



© SCHOOLMOUV

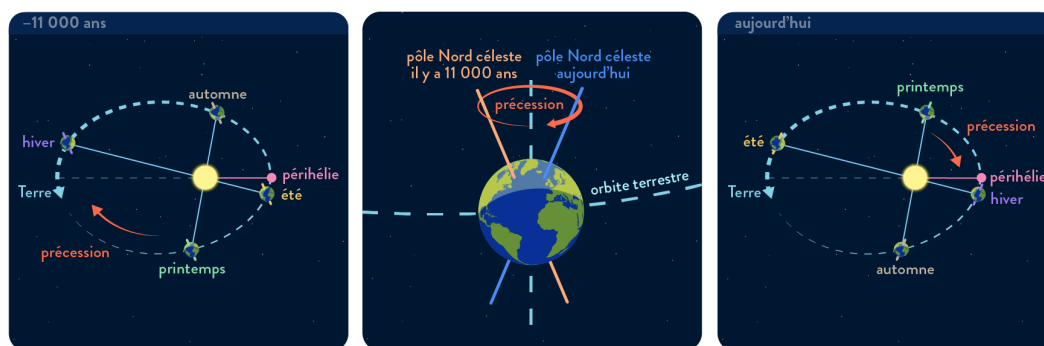
### 3 Précession des équinoxes

Ce paramètre correspond à la combinaison de la variation de l'orientation du grand axe de l'ellipse et de l'orientation de l'axe de rotation de la Terre.

- L'orientation du grand axe détermine à quel mois de l'année la Terre se trouve en périhélie.

## Précession des équinoxes

saisons données pour l'hémisphère Nord



© SCHOOLMOUV

- Il y a 11 000 ans, les saisons étaient très marquées (été chaud et hiver froid), car la Terre était au périhélie au solstice d'été. Actuellement, la Terre est au

périhélie au solstice d'hiver, donc les contrastes saisonniers s'atténuent (été plus frais et hiver plus doux).

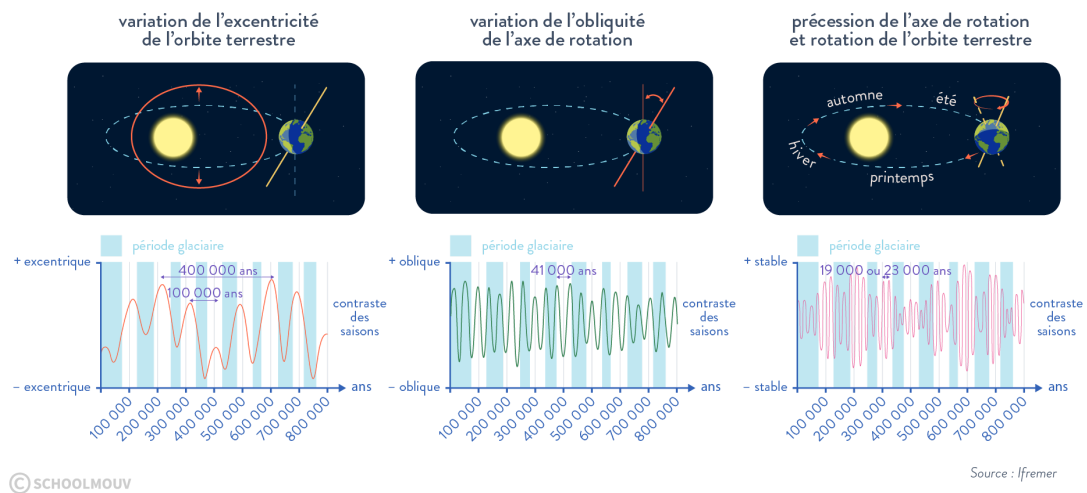


Les contrastes saisonniers causés par la position en périhélie ne prennent pas en compte l'augmentation actuelle du dioxyde de carbone d'origine anthropique, qui augmente le nombre d'étés chauds.

La périodicité de la précession des équinoxes est d'environ 19 000 ans ou 23 000 ans.



### Les paramètres de Milankovitch et leur périodicité



→ L'ensemble des paramètres astronomiques de Milankovitch ont une périodicité définie.

L'obliquité vient renforcer ou atténuer le contraste saisonnier mais son amplitude est moins impactante que les deux autres paramètres, car c'est un paramètre avec une très petite variation.



Les météorites

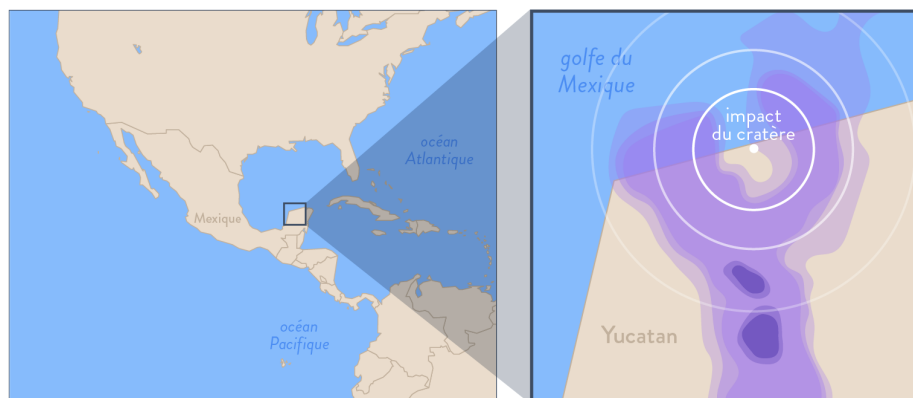
La dernière cause externe aux variations climatiques que nous allons aborder est l'arrivée d'une **météorite** sur Terre.

En 1980, le physicien américain Alvarez et son équipe découvrent une forte quantité d'iridium dans les couches sédimentaires datant de la fin du Crétacé en de nombreux endroits du globe.

L'iridium est très rare sur Terre : ils posent donc l'hypothèse d'une origine extraterrestre liée à une ou des météorites.

Dans les années 1990, au Mexique, on découvre que la péninsule du Yucatan est en réalité le lieu d'un impact météoritique gigantesque ( **200 km** de diamètre) datant de la fin du Crétacé : le cratère du Chicxulub. Cet impact a été provoqué par un astéroïde d'environ **10 km** de diamètre.

#### Localisation du cratère du Chicxulub



© SCHOOLMOUV

Les conséquences pour le climat ont été planétaires et durables.

La mise en suspension dans l'atmosphère d'une grande quantité de matière (roches, aérosols soufrés, vapeur d'eau) a engendré une chute de la luminosité et de la température (estimée à  $-26^{\circ}\text{C}$  par rapport à la normale de l'époque) et a généré des pluies acides. Cela induit la chute de la photosynthèse et le dépérissement des chaînes alimentaires (disparition des dinosaures), mais aussi l'acidification des océans (forte extinction d'espèces marines).

Sur le long terme, il y a eu un réchauffement de la planète par effet de serre.

Nous allons voir enfin que les causes de la variabilité du climat sont aussi propres à la Terre.

L'effet de serre est l'une des causes internes qui vont entraîner une variabilité climatique. Cet effet est exacerbé par les activités humaines.

### 3 | Les causes terrestres de la variabilité naturelle du climat et le rôle d'amortisseur de l'océan

Les causes terrestres de la variabilité du climat entretiennent le changement climatique initié.

Une cause augmentant le réchauffement va être à son tour accentuée par le réchauffement : on parle de **rétroaction positive**.

Au contraire, si une cause atténue la variabilité du climat, cette atténuation va diminuer la cause à son origine : on parlera de **rétroaction négative**.

#### a. Fonte des glaces et albédo



→ En 100 ans, le glacier a perdu en longueur et en épaisseur (trait rouge : front du glacier).

## Évolution de la taille de la banquise entre août 1979 et août 2019

8 millions de kilomètres carrés pour 1979



© SCHOOLMOUV

5 millions de kilomètres carrés pour 2019



Source : ©National Snow & Ice Data Center

→ La banquise a perdu 30 % de sa superficie en 40 ans.

Ces images nous permettent d'établir un constat évident : on assiste à une forte diminution des surfaces de glace dans l'hémisphère Nord.



Cette diminution des surfaces de glace agit aussi en retour sur le climat. En effet, la **fonte des glaciers (glace continentale) et de la banquise (glace océanique)** va **diminuer l'albédo** des territoires concernés.



Pour rappel, l'albédo correspond à la quantité de lumière du Soleil réfléchi par une surface. C'est une grandeur sans dimension exprimée par un pourcentage ou une valeur entre 0 et 1.

La neige a un albédo situé entre 0,6 et 0,9, tandis que la forêt a un albédo situé entre 0,05 et 0,2.

→ En passant d'un albédo fort à un albédo faible, la chaleur ne va plus être renvoyée dans l'atmosphère mais absorbée majoritairement par les sols ou les océans.

Cela va donc **augmenter les flux de chaleur latente et sensible** au niveau des interfaces avec l'atmosphère.

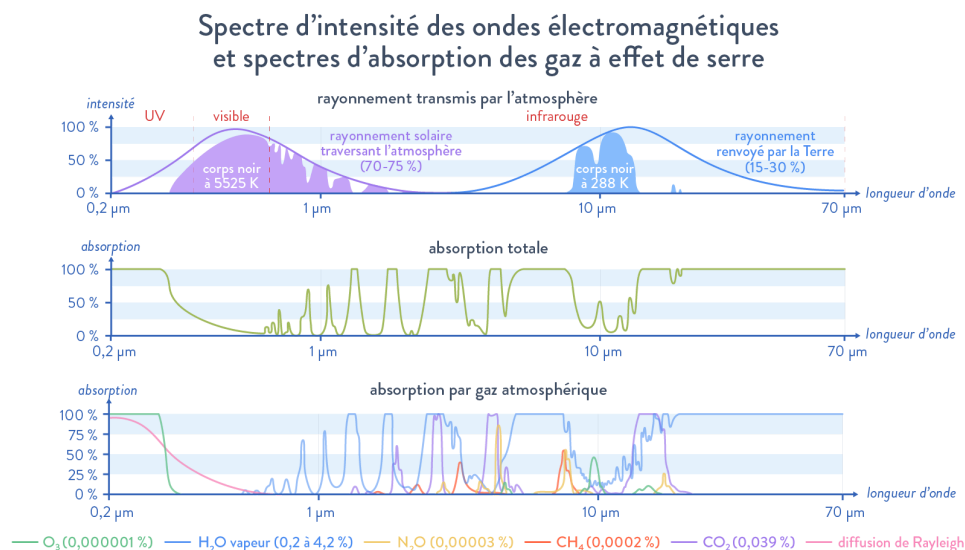
Une autre cause de la variabilité climatique est l'émission de gaz à effet de serre. Ces émissions peuvent être naturelles (cycle du carbone) ou d'origine humaine.

- b. Les émissions de gaz à effet de serre d'origine naturelle et anthropique



Les **gaz à effet de serre** sont principalement la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le méthane ( $\text{CH}_4$ ).

La part de responsabilité des différents gaz dans l'effet de serre peut être estimée à l'aide de l'**absorbance du rayonnement électromagnétique** (spectre entier du rayonnement solaire).



© SCHOOLMOUV

- Les diagrammes 1 et 2 sont complémentaires : les longueurs d'onde pour lesquelles le rayonnement électromagnétique est peu ou pas absorbé (2) correspondent au rayonnement transmis (1).

Les courbes des GES montrent les contributions de certains gaz constitutants de l'atmosphère à l'opacité atmosphérique. Les longueurs d'ondes absorbées sont propres à chaque molécule, et se situent dans de nombreuses bandes d'absorption. Les bandes d'absorption les plus larges sont dues aux gaz à effet



de serre ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ) qui absorbent la quasi-totalité des rayonnements dans les infrarouges, du proche infrarouge aux infrarouges lointains.

→ 70 % à 75 % des radiations solaires traversent l'atmosphère et 15 % à 30 % des radiations sont renvoyées par la Terre ( surtout sous forme d'infra-rouge).

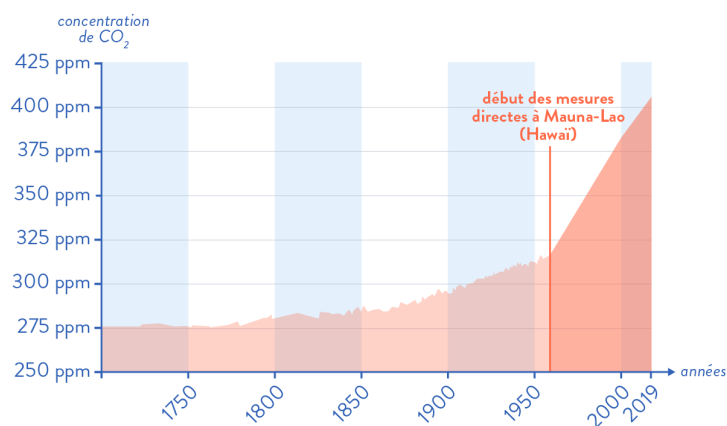
Le gaz à effet de serre le plus important est la vapeur d'eau, mais son taux dans l'atmosphère reste très stable.

Au contraire le dioxyde de carbone absorbe une part moins importante du rayonnement, mais sa quantité croissante dans l'atmosphère est liée à un **effet de serre d'origine anthropique (origine humaine)**. L'activité volcanique va aussi être source de libération du dioxyde de carbone de manière ponctuelle, mais potentiellement massive, jouant à travers les âges sur l'effet de serre naturel.

L'augmentation du dioxyde de carbone commence avec la révolution industrielle, très dépendante du charbon.

Puis, le suivi du dioxyde de carbone par mesure directe permet de rendre compte d'une très forte augmentation depuis 1958 (date d'ouverture de l'observatoire de Mauna Loa) : la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone passe de **315 ppm** (partie par million) en 1958 à **415 ppm** en 2019.

Concentration atmosphérique de dioxyde de carbone



© SCHOOLMOUV

Source : ©Scripps Institute of Oceanography

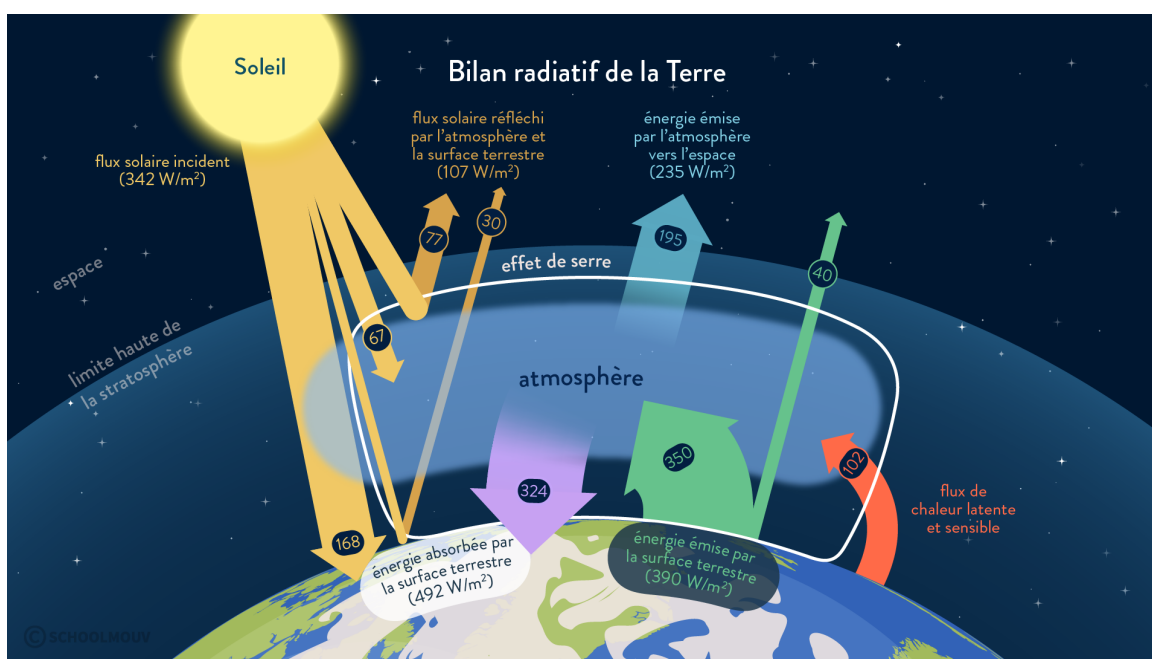


La concentration atmosphérique de dioxyde de carbone d'avant 1958 est mesurée dans les bulles d'air emprisonnées dans la glace.

À partir de 1958 en revanche, nous disposons de mesures directes.

L'impact des différents gaz à effet de serre sur le **bilan radiatif de la Terre** entraîne une **augmentation de l'absorption d'énergie par l'atmosphère**.

→ L'effet de serre naturel et anthropique va capter plus de flux solaire incident et en réfléchir moins, mais aussi garder une plus grande part de l'énergie émise par la surface de la Terre ainsi que les flux de chaleur latente et sensible.



Cet impact sur le bilan radiatif correspond au **forçage radiatif** (degré de modification du bilan radiatif de la Terre). Ce sont des paramètres qui impactent le bilan radiatif soit positivement, entraînant donc un réchauffement du système, soit négativement, entraînant un refroidissement du climat.

Les gaz à effet de serre ayant une longue période de résidence dans l'atmosphère et un impact planétaire, ils peuvent augmenter la force radiative jusqu'à  $3 W/m^2$ . Cependant, la présence d'aérosol va refroidir le système et on observe effectivement un forçage de  $2 W/m^2$  actuellement. Les aérosols, surtout sulfatés ou soufrés, réfléchissent une grande part du rayonnement, créant un effet parasol. Finalement, l'ensemble engendre tout de même un réchauffement global de la planète.



L'augmentation des GES d'origine anthropique est renforcée par la libération de dioxyde de carbone et de méthane contenus dans le **permafrost (ou pergélisol)**.



## Définition

### Permafrost :

Le permafrost correspond à une couche de sol gelée tout au long de l'année et couvrant 25 % des terres de l'hémisphère Nord.

Les zones de permafrost



© SCHOOLMOUV

Source : ©Woods Hole Research Center

→ Le réchauffement global provoque le dégel du permafrost en de nombreux endroits, libérant ainsi de grandes quantités de gaz à effet de serre. Cela constitue une rétroaction positive dans le réchauffement climatique.

Mais il existe aussi des facteurs permettant d'atténuer le réchauffement climatique.

C'est le cas par exemple de la **végétalisation**, qui constitue une rétroaction négative d'origine anthropique (elle constitue donc l'opposé de la déforestation, qui constitue une rétroaction positive anthropique). La végétalisation permet une plus grande évaporation naturelle. Cela augmente les précipitations et diminue les sécheresses.

Depuis quelques années, plusieurs projets de végétalisation voient le jour sur des terres qui ont subi la déforestation ou dont la biodiversité est en danger (exemple : projet du moteur de recherche Ecosia) ou même au sein des villes (exemple : projet des « *forest cities* », notamment en Chine).



D'autre part, une forêt en pleine croissance est un formidable **puits de carbone** pour atténuer les émissions anthropiques. Dans la gestion des villes du futur, la végétation sera au cœur des aménagements pour ces raisons.

Avec ce réchauffement climatique, on parle de plus en plus de la montée du niveau des mers. Mais est-ce la seule conséquence sur les océans ?

### **c.** L'océan : un rôle d'amortisseur



L'océan n'est pas une cause de la variabilité du climat : il se situe au contraire du côté des conséquences, puisqu'il est impacté par les variations climatiques. Mais la modification des caractéristiques océaniques sous l'effet des variations climatiques va à son tour accentuer cette variabilité (rétroaction positive).

Le réchauffement global de la planète a plusieurs effets sur l'océan. Une part de la chaleur va s'accumuler dans les couches superficielles de l'océan. Cela peut **modifier la circulation thermohaline**, c'est-à-dire les grands courants marins à travers les océans en surface comme vers les

fonds de l'océan. Cette circulation participe au transport de l'énergie thermique vers des profondeurs plus importantes ou des latitudes plus fraîches.

De plus, le réchauffement global provoque la **dilatation thermique de l'eau**.

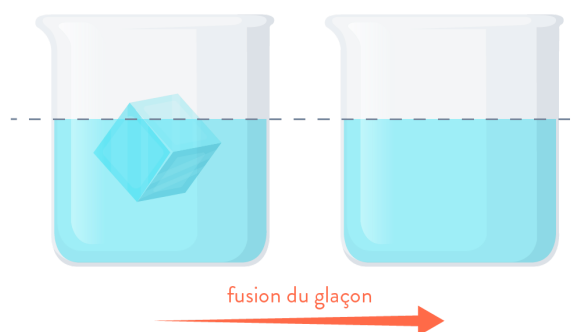
Une même quantité de molécules d'eau prend alors un volume plus important. Cela concourt pour partie à l'augmentation du niveau des mers. En un siècle, les scientifiques estiment à **15 cm** l'élévation des mers liée à la dilatation thermique.

Cette élévation est renforcée par la fonte des glaces continentales. En effet, lors de la fonte, l'eau sur les continents va rejoindre les mers et océans, augmentant d'autant leur volume d'eau.



La fonte des banquises (glaces sur l'océan) ne modifie pas le niveau des océans, car le volume déplacé par la glace correspond parfaitement au volume de l'eau liquide après fusion.

Une analogie simple permet de le comprendre : le niveau d'eau entre le bécher avec glaçon et le bécher avec le glaçon fondu est bien strictement identique.



© SCHOOLMOUV

Le suivi du niveau de la mer se fait par des balises marines et par satellites. Sur tout le XX<sup>e</sup> siècle, on estime que le niveau marin est monté d'environ **1,7 mm** par an. Mais cette augmentation s'accélère, puisque depuis les années 1990, l'élévation du niveau des océans se situe plutôt autour de **3 mm** par an.

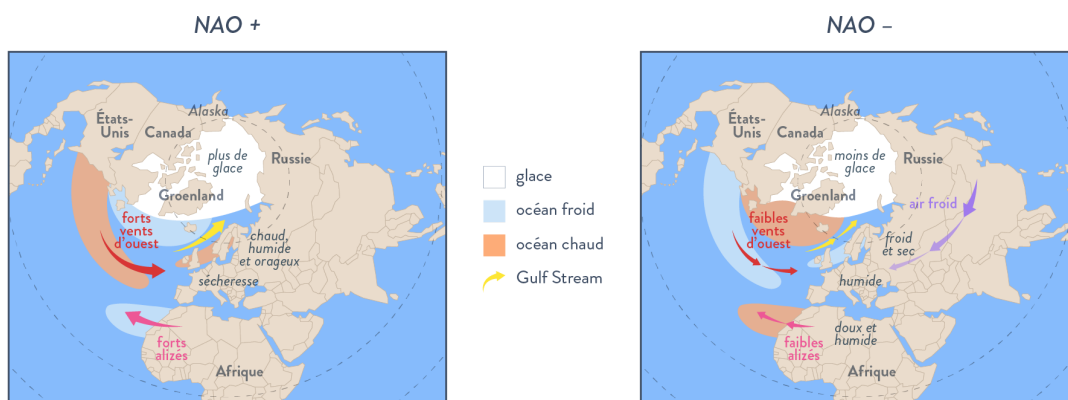


L'augmentation de la température des océans ainsi que la fonte des glaces sont des rétroactions positives sur le réchauffement climatique actuel, puisqu'elles l'accroissent.

Un autre élément influant la variabilité climatique, en lien direct avec l'océan, est l'**oscillation nord-atlantique** ou australe. Ces oscillations correspondent à des couplages entre la **dynamique des masses d'eau** et la **dynamique des masses d'air**.

Les courants marins apportant de la chaleur de l'équateur vers les pôles impactent le climat régional et donc la dynamique de l'atmosphère. Cet indice est calculé en se fondant sur les différences de pression atmosphérique entre Reykjavik (Islande) et Lisbonne (Portugal). En fonction des apports plus ou moins importants de chaleur par l'océan, la dynamique du Jet Stream change (grand courant atmosphérique horizontal allant de l'Amérique du Nord vers l'Europe du Nord).

### Oscillation nord-atlantique (NAO)





- Lors d'une oscillation positive, il y aura plus de tempêtes hivernales apportant une forte pluviométrie sur l'Europe du Nord et, au contraire, un hiver sec sur le sud de l'Europe. Le sud des États-Unis connaît aussi de forte pluie.
- Lors d'une oscillation négative, Il y a une forte pluviométrie sur le sud de l'Europe, une sécheresse plus importante au nord de l'Europe et le sud des États-Unis connaît des vagues de froid très importantes.



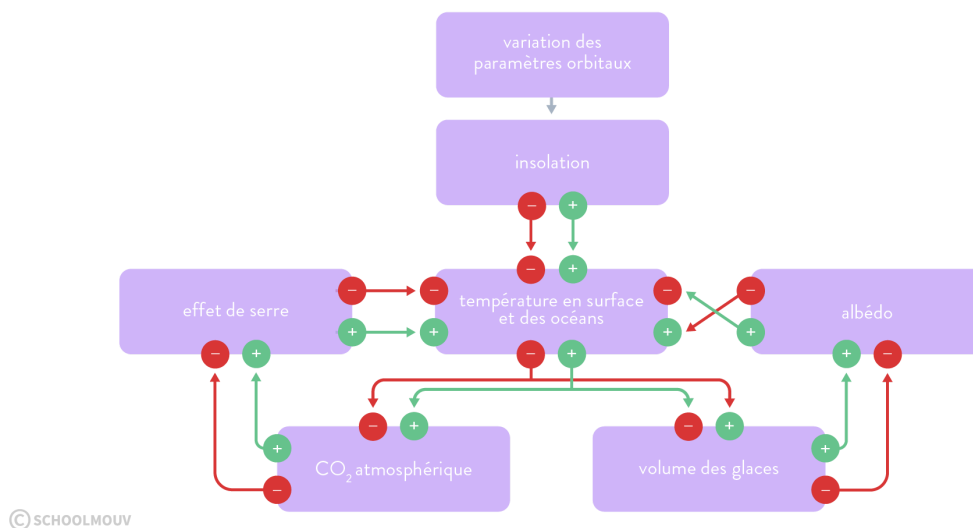
L'océan a un rôle amortisseur en absorbant à sa surface une fraction importante de l'apport additionnel d'énergie. Cela conduit à une élévation du niveau de la mer par dilatation thermique de l'eau. À celle-ci s'ajoute la fusion des glaces continentales. Cette accumulation d'énergie dans les océans rend le changement climatique irréversible à des échelles de temps de plusieurs siècles.

Conclusion :

Le climat de la Terre connaît une variabilité naturelle identifiable grâce aux marqueurs de température ou de pluviométrie ( $\delta^{18}\text{O}$ , pollen). Cette variabilité s'explique en partie par des facteurs astronomiques sur des échelles de temps longues (400 000 à 19 000 ans) ou très courtes pour le cycle solaire (11 ans). Enfin, des causes externes ponctuelles mais non négligeables comme les météorites ont pu affecter le climat terrestre et la biosphère.

Le climat actuel est toujours soumis aux mêmes conditions externes, mais viennent s'y ajouter des paramètres internes et/ou d'origine anthropique. La diminution des surfaces de glaces contribue au réchauffement en atténuant l'albédo. Au contraire, la végétalisation augmente l'albédo, atténuant ainsi le réchauffement. Les gaz à effet de serre et les mouvements océaniques engendrent des variations thermiques importantes sur Terre. De manière artificielle, l'être humain renforce les effets du réchauffement climatique par ses émissions de GES d'origine fossile. Les actions et rétroactions vont alors toucher les glaces continentales ou océaniques mais aussi la dynamique des enveloppes fluides (océans et atmosphère).

## Bilan des rétroactions climatiques



- ➔ Exemple de lecture : si l'insolation augmente (+), on a des températures plus élevées (+), ce qui provoque une diminution du volume des glaces (–) et de l'albédo (–), et donc une hausse des températures (+).

La connaissance du climat passé mais aussi des enjeux autour du changement climatique observable à l'échelle d'une vie humaine permettra aux décideurs et aux scientifiques d'agir pour le climat du futur et de le prévoir.