

Leçon 2 : Les climats du passé

“Le climat change, soit... En lui-même, ce constat n'a rien de nouveau. Un simple regard vers le passé le confirme. Ce regard, celui du paléoclimatologue, est nécessaire afin de comprendre comment fonctionne le système climatique, et d'en dessiner les évolutions futures.”
 Jouzel J., A. Debroise. Le défi climatique. Objectif 2°C ! édition Dunod (Quai des Sciences), 2014

1. Les successions glaciaires-interglaciaires

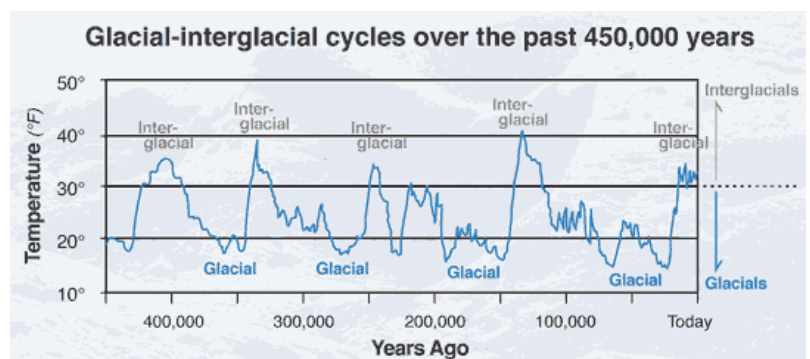
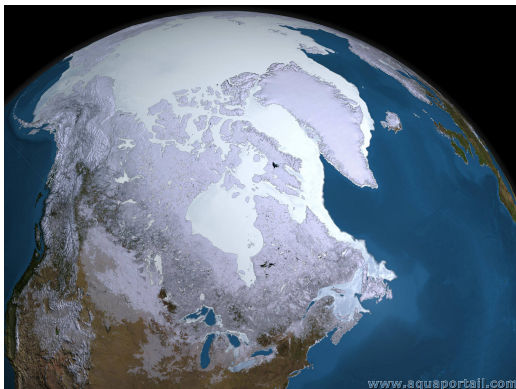
La paléoclimatologie a pour but de reconstituer l'histoire du climat et d'en comprendre les mécanismes. Ceci est possible car les conditions climatiques ont une influence sur les matières et sur les êtres vivants. Ainsi, les roches, les fossiles, les sédiments, les glaciers ou encore les coraux renferment de précieuses informations sur les conditions climatiques passées.

Les études paléoclimatiques ont révélé l'existence de variations climatiques importantes au cours des derniers millions d'années avec des périodes de glaciation étendue alternant avec des périodes plus chaudes. Au cours de ces successions glaciaires-interglaciaires, les calottes polaires ont avancé et reculé, influençant les niveaux des océans et les habitats.

Une **ère glaciaire** est une période de l'histoire de la Terre caractérisée par une extension significative des calottes glaciaires et des glaciers, ainsi que des températures globalement plus basses. Au cours d'une ère glaciaire, la glace peut recouvrir d'importantes parties des continents, modifiant radicalement les paysages et influençant les écosystèmes.

Au cours d'une grande ère glaciaire typique, plusieurs petits cycles glaciaires-interglaciaires se produisent, avec des phases caractérisées par une expansion des glaciers suivies de phases plus chaudes, pendant lesquelles la glace fond et se retire. Ces cycles ont des périodes de l'ordre de milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années.

La Terre a connu plusieurs grandes ères glaciaires au cours de son histoire géologique, et la plus récente est l'ère quaternaire, qui a débuté il y a environ 2,6 millions d'années. Au sein de l'ère quaternaire, nous sommes actuellement dans une période interglaciaire appelée l'Holocène, qui a débuté il y a environ 11 700 ans.



© <https://geology.utah.gov/map-pub/survey-notes/glad-you-asked/ice-ages-what-are-they-and-what-causes-them/>

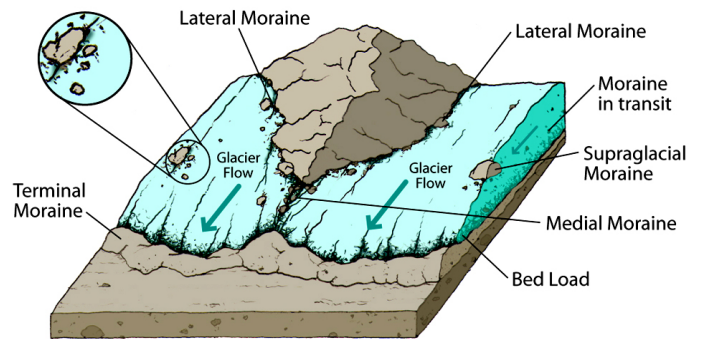
Il est important de noter que le terme "ère glaciaire" peut également être utilisé dans un sens plus large pour décrire des périodes de temps où la Terre était largement couverte de glace. Par exemple, l'ère glaciaire du Protérozoïque, il y a environ 2,4 milliards d'années, est souvent évoquée pour décrire une période où des glaciers recouvraient une grande partie de la planète.

La période du Quaternaire, qui a débuté il y a environ 2,58 millions d'années, est caractérisée par une succession de périodes glaciaires et interglaciaires. La dernière glaciation, aussi appelée glaciation de Würm ou glaciation du Wisconsin, a débuté il y a environ 115 000 et a culminé il y a environ 20 000 ans. Elle a été suivie par une période interglaciaire, l'**Holocène**, qui persiste jusqu'à nos jours.

La glaciation de Würm a fortement influencé l'Europe centrale et septentrionale, couvrant de vastes régions sous des glaciers de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Durant cette période, les glaciers alpins ont érodé le paysage, créant des **moraines**, des cirques glaciaires et d'autres caractéristiques glaciaires.



Moraine



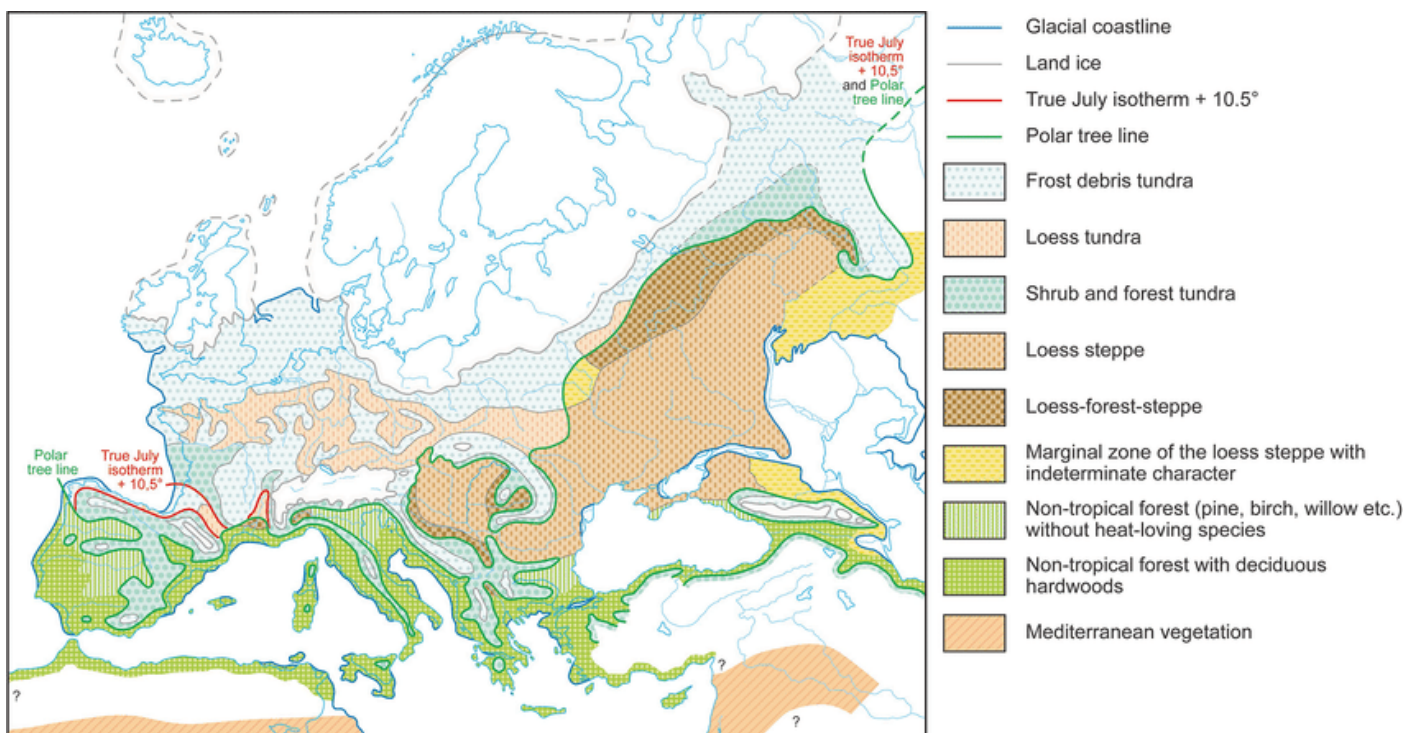
© NatGeo

Le climat de l'Europe il y a 20 000 ans

- Les températures moyennes annuelles étaient inférieures d'environ 10°C par rapport aux températures actuelles.
- Les précipitations étaient également beaucoup moins abondantes qu'actuellement.
- Le sous-sol était gelé en permanence (pergélisol).
- L'eau avait tendance à stagner en surface et des zones marécageuses se forment au cours de la belle saison.
- Le niveau de la mer était 120 plus bas qu'aujourd'hui.

Les conditions glaciaires ont considérablement influencé la distribution des espèces animales et végétales. Les organismes adaptés au climat froid, tels que les mammouths laineux et les bisons steppiques, étaient répandus, tandis que les forêts étaient limitées. Le biome dominant était celui de la **toundra**.

Répartition des biomes en Europe il y a 20 000 ans



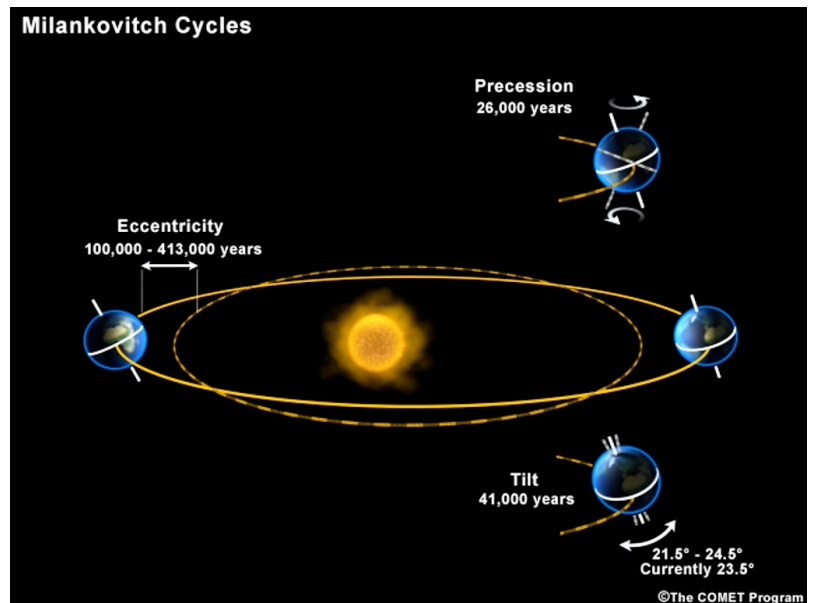
Source : https://researchgate.net/figure/The-climatic-zones-of-Europe-during-the-Wuerm-glaciation-1-Ice-age-coasts-serration_fig1_357130925

2. Les cycles de Milankovitch

Les cycles de Milankovitch se réfèrent à une série de variations périodiques dans les **paramètres orbitaux** de la Terre ce qui a une influence sur le climat terrestre à long terme. Ces cycles ont été formulés par le mathématicien et astronome serbe Milutin Milankovitch au début du XXe siècle pour expliquer les variations climatiques observées au fil du temps géologique.

Les paramètres de Milankovitch

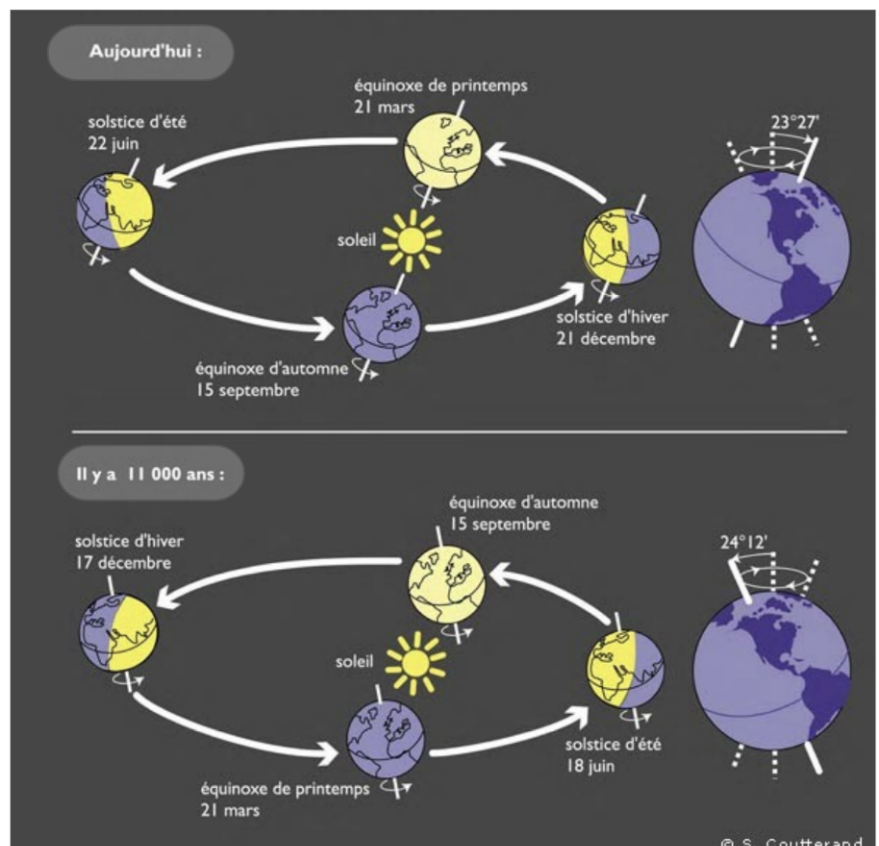
- Excentricité orbitale** : L'excentricité décrit la forme de l'orbite terrestre, qui peut varier d'une ellipse plus allongée à un cercle plus parfait au fil du temps. Cette variation périodique a un cycle d'environ 100 000 ans. Lorsque l'orbite est plus excentrique, l'énergie solaire reçue à différentes saisons varie, influençant le climat.
- Inclinaison axiale** : L'inclinaison axiale se réfère à l'angle entre l'axe de rotation de la Terre et le plan de son orbite autour du Soleil. La variation de l'inclinaison axiale a un cycle d'environ 41 000 ans. Lorsque l'inclinaison est plus élevée, les saisons sont plus marquées, ce qui peut entraîner des variations climatiques.
- Précession des équinoxes** : La précession est le changement de l'orientation de l'axe de rotation de la Terre au fil du temps. Le cycle de précession a une période d'environ 26 000 ans. Elle influe sur la date à laquelle la Terre est le plus éloignée ou le plus proche du Soleil pendant une saison particulière.



Ces cycles de Milankovitch affectent la distribution saisonnière de l'énergie solaire à la surface de la Terre, ce qui peut influencer les climats régionaux et globaux.

Les variations de l'insolation (l'énergie solaire reçue) à différentes latitudes et saisons peuvent entraîner des changements dans les régimes de précipitations, les calottes glaciaires, les périodes glaciaires et interglaciaires, ainsi que d'autres changements climatiques.

Il est important de noter que bien que les cycles de Milankovitch soient une composante clé des variations climatiques à long terme, d'autres facteurs, tels que les concentrations de gaz à effet de serre, les variations dans l'activité solaire et d'autres rétroactions climatiques, jouent un rôle dans la modulation du climat terrestre.



3. Les témoins paléoclimatiques

Un témoin ou **proxy climatique** est un indicateur ou une archive naturelle qui permet aux scientifiques d'obtenir des informations sur les conditions climatiques passées. Ces proxies climatiques sont des enregistrements environnementaux provenant de diverses sources géologiques et biologiques. Ils agissent comme des témoins indirects du climat, en enregistrant des variations dans leur composition, leur structure ou leurs propriétés physiques en réponse aux changements climatiques.

Chaque proxy climatique possède ses propres caractéristiques et limites, mais tous permettent de reconstruire des informations sur des variables climatiques spécifiques, telles que la température, la précipitation, la pression atmosphérique, la composition atmosphérique, et d'autres paramètres.

L'utilisation de proxies climatiques dans la recherche scientifique permet de remonter dans le temps et d'obtenir des données sur les climats passés bien avant l'époque où les enregistrements météorologiques officiels ont commencé. Ces informations sont cruciales pour comprendre les mécanismes des changements climatiques, pour valider les modèles climatiques, et pour contextualiser les tendances actuelles observées dans le climat global.

2.1. L'étude des moraines de glace et la théorie des âges glaciaires

A la fin du 18^e siècle, le géologue Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) observe la curieuse présence de dépôts glaciaires dans le fond d'une vallée des Alpes. Saussure s'interroge car cette présence n'est pas banale. Ces roches se trouvent habituellement bien plus haut en altitude. Il émet alors l'hypothèse que les glaciers ont diminué de volume par rapport à une époque antérieure. Quelques années plus tard, d'autres scientifiques (Venetz, De Charpentier, Agassiz) se rendent à leur tour dans les Alpes. Les moraines glaciaires les intriguent. En 1840, Louis Agassiz émet l'hypothèse suivante : *l'étendue des glaciers a fluctué sur de longues périodes. Les moraines se seraient alors déposées dans le fond des vallées lors d'un recul des glaciers associé à un réchauffement des températures.*

Extraits de *Sur l'étude des glaciers* (Louis Agassiz, 1840)

Il est assez difficile de se faire une juste idée des glaciers lorsqu'on n'en a pas vu; et même lorsqu'on les a examinés de près.

L'apparition de ces grandes nappes de glace a dû entraîner à sa suite l'anéantissement de toute vie organique à la surface de la terre. Le sol de l'Europe, orné naguère d'une végétation tropicale et habité par des troupes de grands éléphants, d'énormes hippopotames et de gigantesques carnassiers, s'est trouvé enseveli subitement sous un vaste manteau de glace recouvrant indifféremment les plaines, les lacs, les mers et les plateaux.



Joseph Bettanier : "Glacier inférieur de l'Aar"

Mais cet état de chose eut sa fin, une réaction s'opéra : les masses fluides de l'intérieur de la terre bouillonnèrent encore une fois avec une grande intensité ; leur action se fit sentir dans la direction de la chaîne principale des Alpes, dont les roches furent altérées de diverses manières et soulevées jusqu'à hauteur actuelle, avec la croûte de glace qui les recouvrait; celle-ci fut même disloquée comme une formation rocheuse ordinaire. D'énormes débris de rochers se détachèrent alors simultanément des crêtes qui dominaient la nappe de glace, comme, par exemple, du Mont-Blanc, dont le soulèvement est antérieur à celui des Alpes occidentales, et des brisures que l'apparition de la chaîne principale des Alpes venait occasionner à l'extrémité du massif du Mont-Blanc et dans toute la partie centrale et orientale de la chaîne. Une fois gisant à la surface du massif de glace qui remplissait l'espace compris entre les Alpes et le Jura, ces débris s'y sont mus comme à la surface d'un grand glacier.

Les **moraines** proprement dites ne commencèrent à se déposer que du moment que les glaces se furent retirées dans les vallées. La forme et la succession de ces moraines nous prouvent que ce retrait des glaces, loin d'avoir été instantané, s'est, au contraire, opéré d'une manière lente et graduelle; d'où je conclus que l'époque de la plus grande extension des glaces a dû durer assez longtemps.

Les **blocs erratiques**, qui diffèrent si fort des moraines, dans leur disposition générale, ne sauraient donc en aucune manière être confondus avec ces dernières; puisqu'ils s'étaient déposés avant la formation des moraines, c'est-à-dire lorsque les glaces occupaient encore toute la plaine suisse.

2.2. Les carottages polaires

A partir des années 1950, les techniques de mesure s'améliorent et notre connaissance des paléoclimats progresse.

En 1957, les soviétiques installent la première station de recherche en Antarctique (Vostok). Le site de Vostok est choisi parce qu'il offre des possibilités de forages profonds. Peu après, les équipes françaises et américaines les rejoignent et installent leurs propres bases de recherche ("Dôme C" et "Byrd"). La proximité des équipes de recherche donne spontanément lieu à une coopération internationale.

La station de Vostok



© Todd Sowers (NOAA)

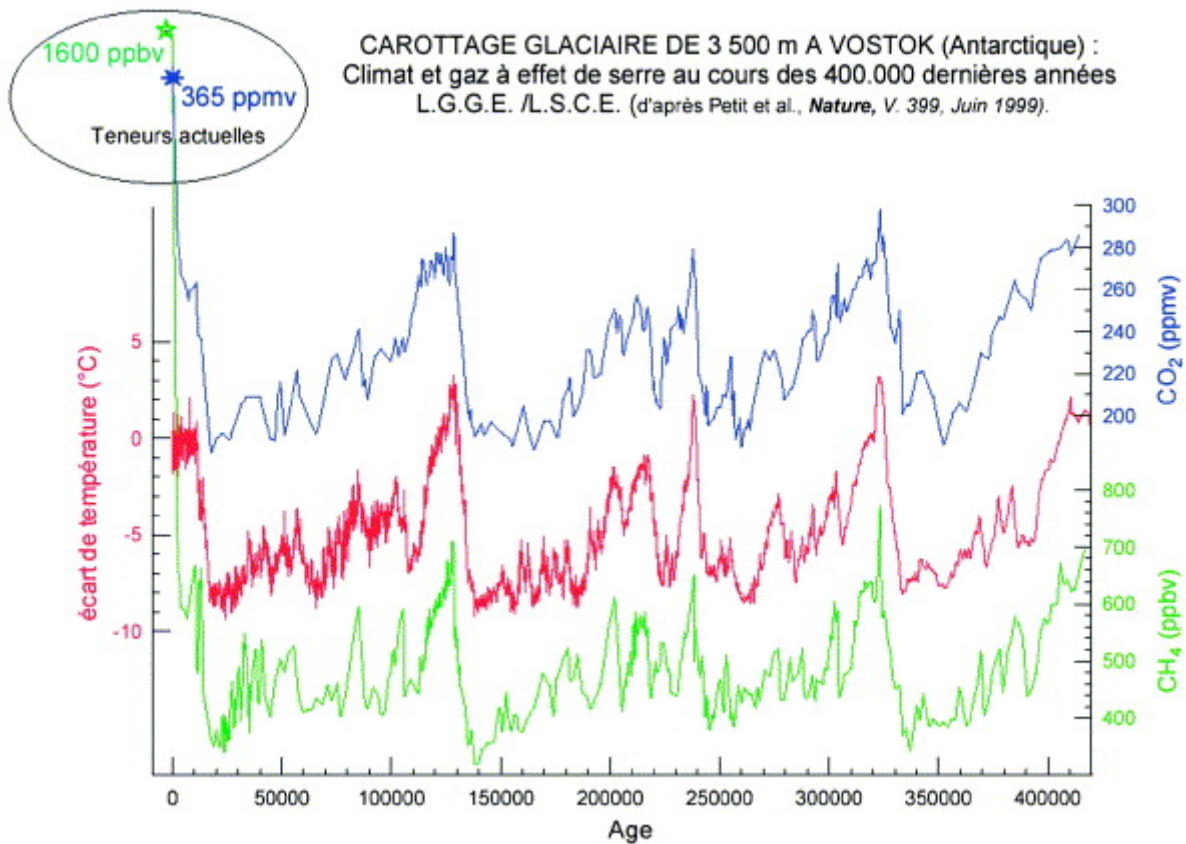
Dans les années 1970, une première série de forages est réalisée par les scientifiques. Les forages atteignent des profondeurs de 500 à 950 mètres. Ces carottages apportent également des renseignements très précieux concernant l'évolution de la composition atmosphérique. En effet, lors de sa formation, la glace emprisonne des bulles d'air qui plus tard témoignent de la composition atmosphérique de l'époque.

L'extraction des bulles d'air contenues dans les glaces antarctique puis, leur analyse chimique, permet aux chercheurs de faire une découverte retentissante. La teneur en gaz carbonique de la dernière période glaciaire, entre 20 000 et 40 000 ans au moins, était inférieure d'environ 30% à celle de la période actuelle.

Dans les années 1980, les forages américains et européens n'atteignent pas une profondeur suffisante pour couvrir la totalité du dernier cycle glaciaire qui commença il y a environ 110 000 ans. En revanche, le forage de Vostok permet d'accéder à la précédente période glaciaire avec environ 150 000 ans d'enregistrement. L'objectif des scientifiques était de couvrir plusieurs cycles glaciaires et les forages de Vostok continuèrent, toujours de plus en plus profonds (2 202 mètres en 1984, 2 546 m en 1990 et 3 623 m en 1996 ce qui représente 420 000 ans de données - 4 cycles glaciaires).

Les données permettent de reconstruire les variations de l'abondance relative de ^{18}O dans l'atmosphère, ce qui est un indicateur des successions glaciaires-interglaciaires, mais aussi des concentrations en gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4). Au fur et à mesure, les scientifiques sont donc capables d'estimer la température atmosphérique du passé (voir graphique ci-après).

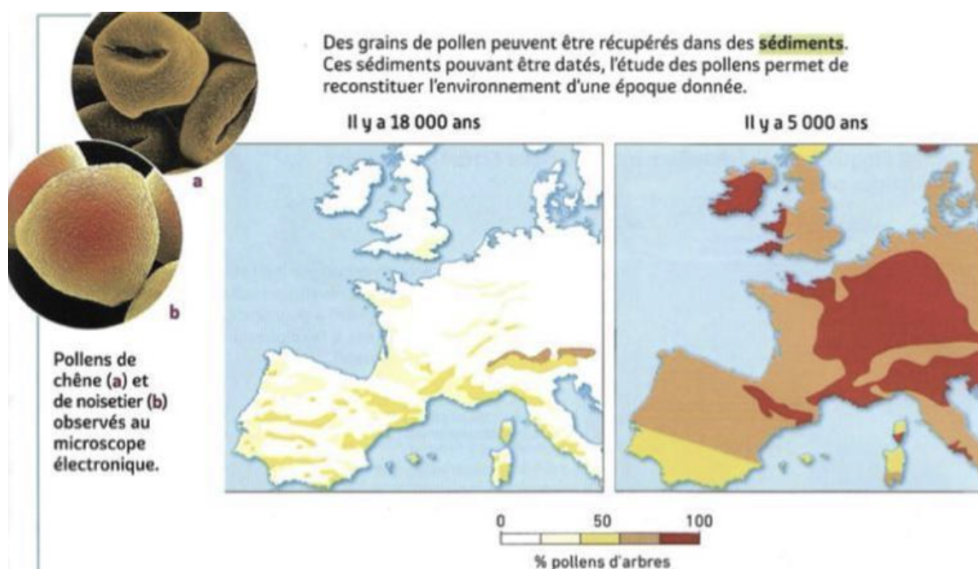
Variation des concentrations atmosphériques de CO₂ et CH₄ et estimation de la température atmosphérique à partir des carottages en Antarctique



© <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071303001032>

2.3. Les carottages lacustres et marins

D'autres données sont recueillies à la suite de la multiplication des programmes de sondage ou de carottages en milieu lacustre et en milieu marin. Les carottages lacustres permettent d'étudier les changements de flores continentales, notamment grâce à l'analyse des pollens contenus dans les strates sédimentaires et témoins de la composition végétale de l'époque.



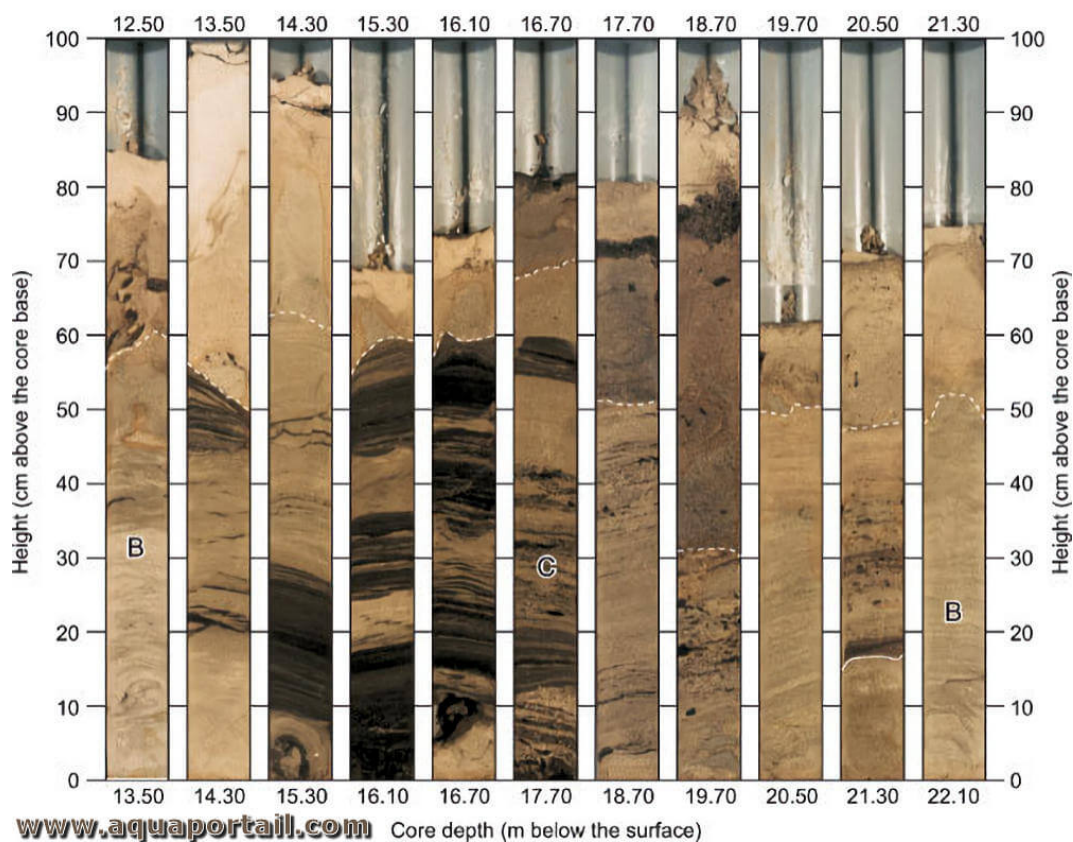
Comparaison de la quantité de pollens issus d'arbres en Europe, il y a 18 000 et 5000 ans.
Moins il y a de chênes et de noisetiers et plus le climat est froid !

Les carottages en mer débutent dans les années 1960. Le plus spectaculaire est le *Deep Sea Drilling Project* (1968-83) coordonné par le *Scripps Institution of Oceanography* et l'*Université de Californie à San Diego*. Ce projet permet de recueillir de précieuses données sur la formation des fonds océaniques et leur expansion.

Le *Glomar Challenger* (navire déployé dans le cadre du *Deep Sea Drilling Project*)



Les carottages effectués en milieu marin nous renseignent sur l'évolution du climat. Les prélèvements peuvent faire jusqu'à 20 mètres de long et chaque centimètre correspond à une période d'environ 1000 ans. Les zones sombres correspondent à des périodes froides et les zones plus claires, à des périodes chaudes.



Les sédiments renferment parfois des fossiles de micro-organismes qui peuvent apporter des informations complémentaires sur l'évolution du climat. Ainsi, la composition isotopique en oxygène des coquilles des Foraminifères est un indicateur des successions glaciaires-interglaciaires.

2.4. L'analyse isotopique

Les **isotopes** sont des éléments chimiques dont les atomes comportent le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons. Ils ont donc le même numéro atomique (nombre de protons) et des propriétés chimiques identiques. En revanche, ils ont des masses atomiques différentes et des propriétés physiques légèrement différentes (notamment dans les réactions de transformation : fusion, cristallisation, évaporation...).

Exemple : Les isotopes de l'oxygène

En période froide, il y a davantage de glace qu'en période chaude. Or, la glace retient l'oxygène O^{16} . Par conséquent, la proportion d'oxygène O^{18} augmente dans l'océan. Donc si on retrouve, une grande proportion de H_2O^{18} dans la coquille des foraminifères, cela signifiait que ces organismes vivaient sous un climat **froid**.

