

Chapitre 2 :

La complexité du système climatique

Le système climatique et son évolution dans le temps résultent de plusieurs facteurs naturels et d'interactions entre océans, atmosphère, biosphère, lithosphère et cryosphère.

Il est nécessaire de prendre en compte ces interactions à différentes échelles spatiales et temporelles (de l'année au million d'années voire davantage).

Le système climatique présente une variabilité spontanée et réagit aux perturbations de son bilan d'énergie par des mécanismes appelés rétroactions.

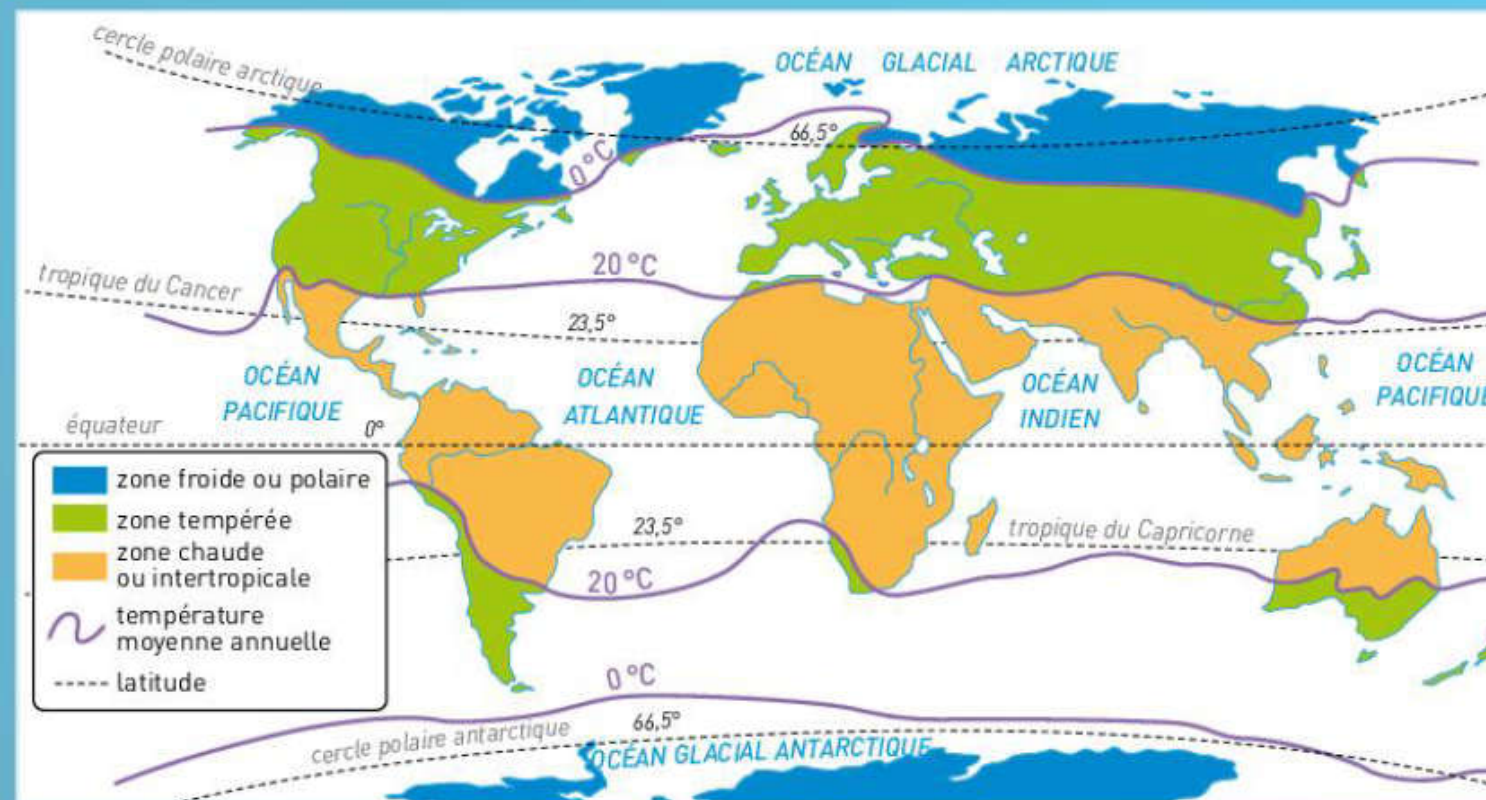
Les facteurs anthropiques ont des conséquences irréversibles à court terme.

SITUATION 1 : Climatologie versus météorologie

Terre interactive : les climats

Les régions terrestres présentant des conditions climatiques identiques forment des « ceintures climatiques » autour de la Terre. Elles sont notamment caractérisées par une température moyenne annuelle à la surface de la Terre. L'influence du Soleil et la forme quasi sphérique de notre planète expliquent en partie leur répartition.

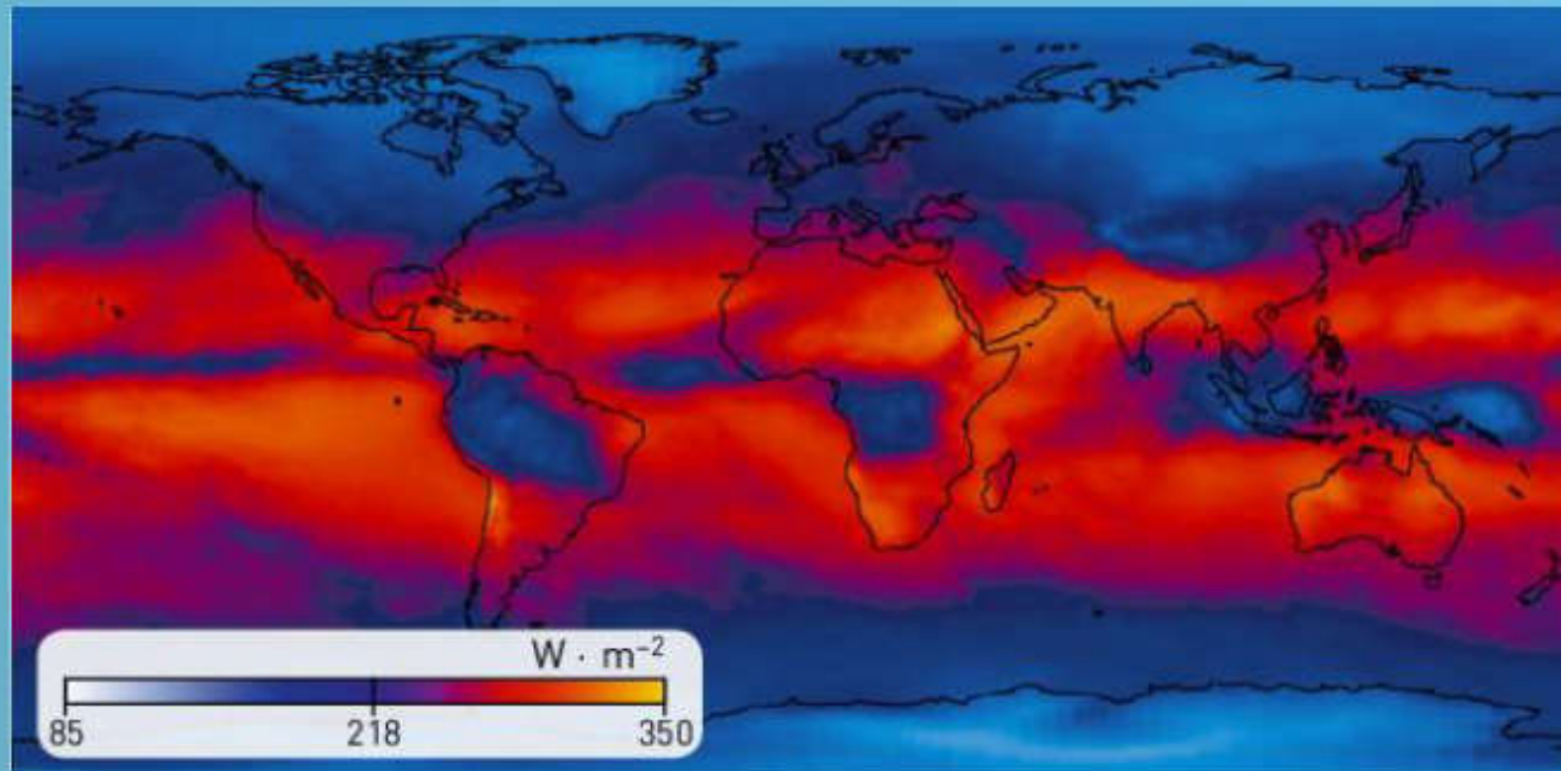
Expliquer pourquoi leur étude relève de la climatologie et non de la météorologie.



L'étude des « bandes circulaires » autour de la Terre relève de la climatologie car les données sur les températures qui délimitent chacune d'entre elles sont des moyennes des températures annuelles acquises sur des durées longues.

SITUATION 2 : L'effet de serre

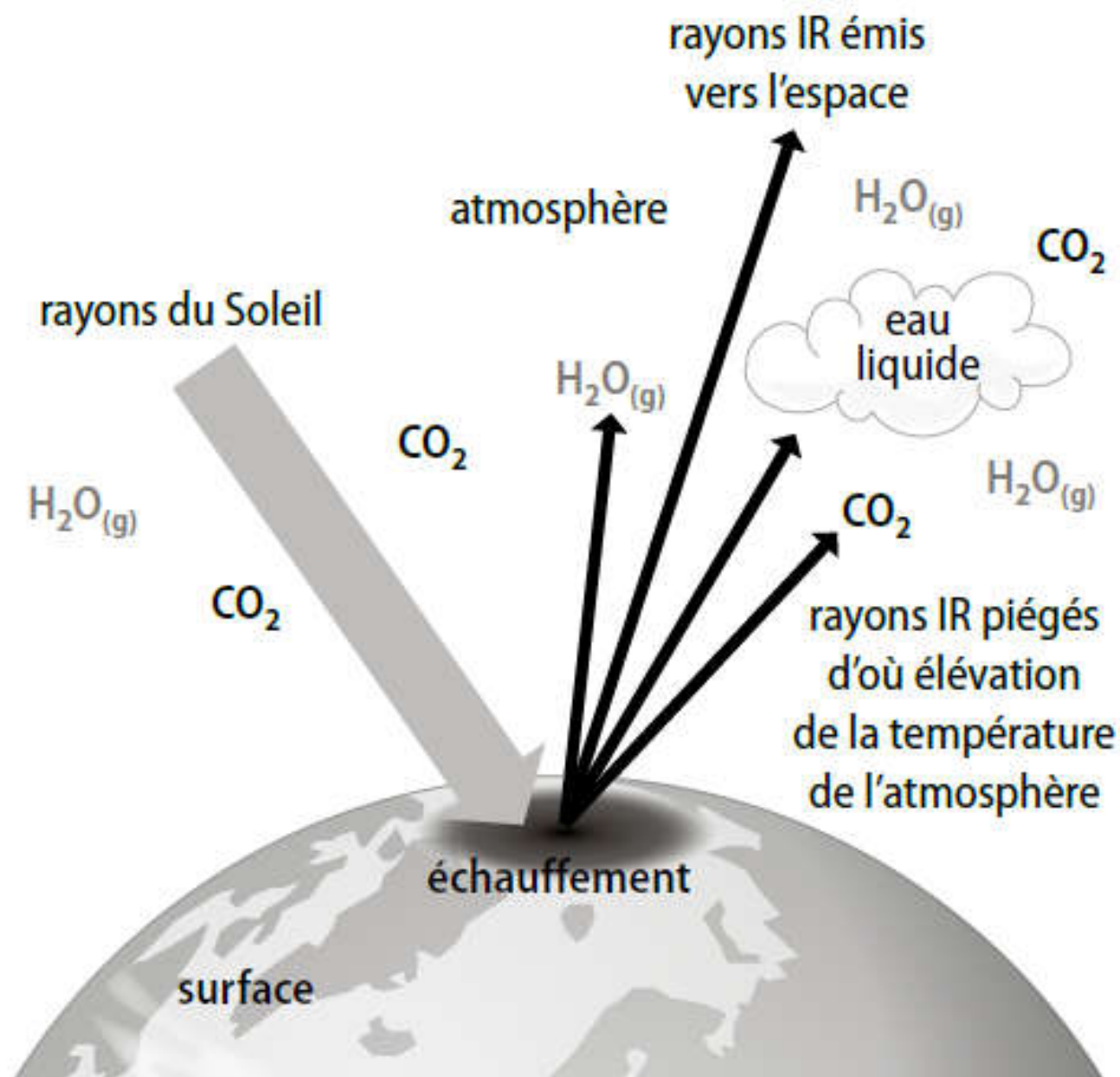
Lors du phénomène naturel de l'effet de serre, plusieurs gaz de l'atmosphère terrestre piègent une partie du rayonnement infrarouge (IR) émis par notre planète. La conséquence est une augmentation globale de la température atmosphérique.



La carte ci-dessus indique la puissance moyenne du rayonnement IR lointain émis par la Terre, en novembre 2018. Dans la zone équatoriale, on observe que ce rayonnement est « bloqué » par d'importantes masses nuageuses.

Citer les deux principaux gaz à effet de serre et proposer un schéma montrant leur rôle.

La vapeur d'eau H_2O (48,4 %) et le dioxyde de carbone CO_2 sont les deux gaz contributeurs majeurs de l'effet de serre.



I. Vers une définition du climat

Problème posé : comment différencier météorologie et climatologie et quels sont les indicateurs du climat actuel ?

→ Activité 1 : répondez à ces questions à partir des pages 40 à 43 de votre livre

Les 6 grandeurs atmosphériques dont les moyennes caractérisent le climat d'une région sont :

- la nébulosité ou couverture nuageuse

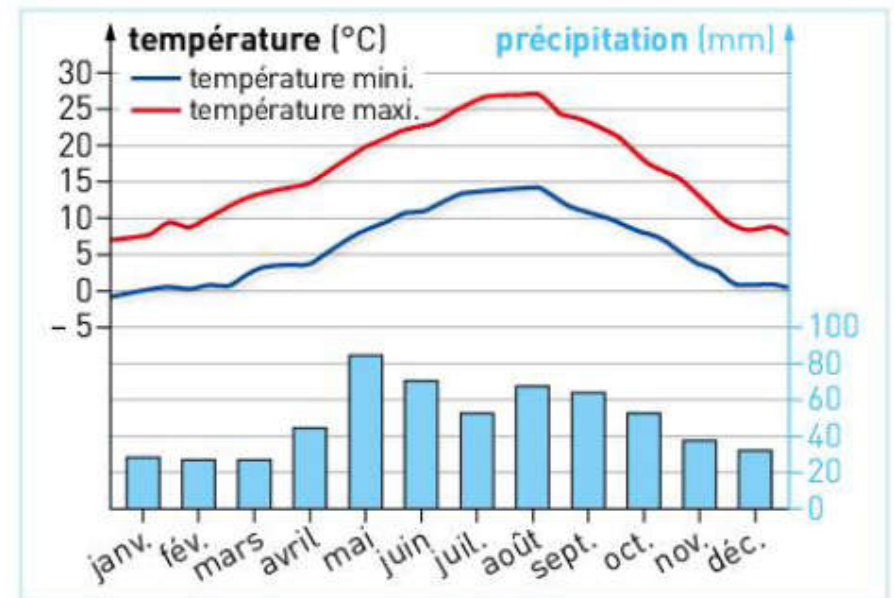
- les températures
- les précipitations

Dans l'esprit de chacun, le **climat** désigne le temps moyen d'une région donnée. Plus précisément, il se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes de grandeurs atmosphériques observées dans une région donnée pendant une période donnée. La période type, définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), est de 30 ans.



a La couverture nuageuse, ou nébulosité, est évaluée en octas*. Ici, le ciel de Paris, entièrement occulté par les nuages, a une nébulosité de 8/8.

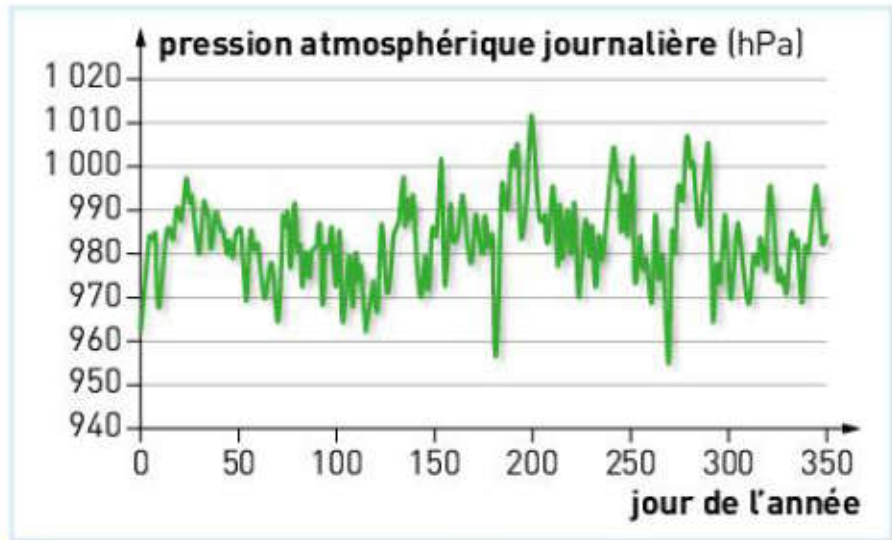
Plusieurs grandeurs atmosphériques principales sont prises en compte (voir les documents ci-dessous). Mais la fréquence des vagues de froid, des épisodes de canicule, des inondations ou des sécheresses... doit également l'être.



b Moyennes des températures et des précipitations mensuelles à Clermont-Ferrand entre 1971 et 2000.

- La pression atmosphérique

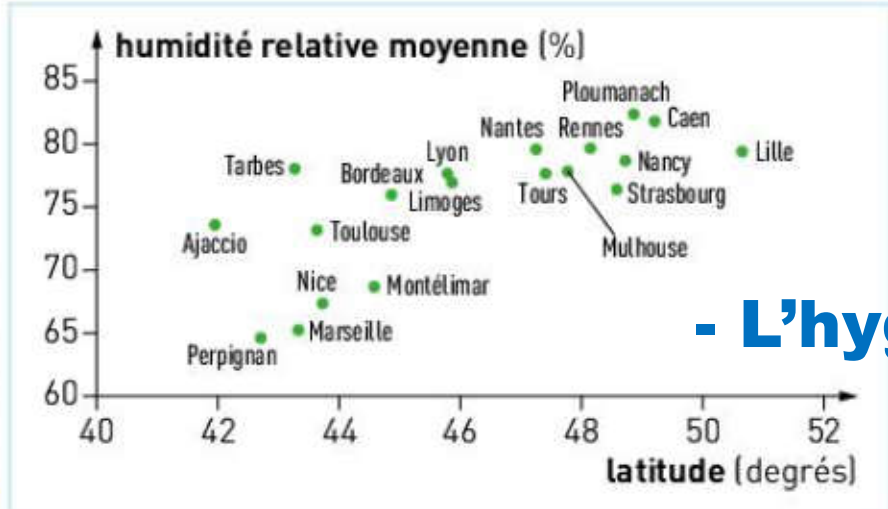
- La direction et la force des vents



c La pression atmosphérique* au niveau de la mer est en moyenne de 1 013 hPa (hectopascals). Cette valeur varie en cours d'année dans un lieu donné, ici l'Antarctique, pour l'année 2013.



d Le mistral souffle à Marseille du nord-ouest vers la Méditerranée à une vitesse moyenne de 50 km/h mais avec de fortes rafales.



- L'hygrométrie

2

La climatologie : des études à moyen ou long terme

Selon l'échelle de temps considérée, la reconstitution du climat local ou planétaire repose sur des indices variés. Le tableau ci-dessous présente quelques exemples d'indices permettant de retracer les grands traits de l'évolution du climat du massif montagneux du Jura pour différentes époques.

Durées de la période étudiée	Périodes concernées	Indices utilisés pour la reconstitution	Résultats obtenus
30 ans	de 1981 à 2010 (normales saisonnières)	relevés météorologiques locaux	climat de type montagnard
350 ans	de 900 à 1 250 environ	écrits historiques, cernes* des arbres	climat chaud et sec (« optimum climatique médiéval »)
1 000 ans	de – 12 700 à – 11 700 ans BP* (Dryas récent)	pollens fossiles déposés dans les lacs	« coup de froid » dans un contexte de réchauffement global
100 000 ans	de – 110 000 à – 10 000 ans BP (Pléistocène supérieur)	traces de glaciers anciens laissées sur les roches	climat très froid, période glaciaire



La météorologie : des études prévisionnelles à court terme

« Brouillard du matin n'arrête pas le pèlerin ». Ce dicton, basé sur l'observation du ciel et des nuages, exprime le fait que les brouillards matinaux dans les vallées sont le présage d'une journée sans pluie ; dicton validé car l'existence de ces brouillards est liée à la présence d'un anticyclone* à l'origine du beau temps. En revanche, le dicton « Noël au balcon, Pâques au tison » a été réfuté par les statistiques. Afin de prévoir le temps, mieux vaut donc faire confiance aux météorologistes !

Leurs prévisions reposent tout d'abord sur la mesure des paramètres atmosphériques puis par leur assimilation dans un modèle* de l'état atmosphérique initial. Ce modèle simule ensuite l'évolution de l'atmosphère pour les jours à venir. Finalement, les prévisionnistes analysent les simulations obtenues et les traduisent en informations accessibles au grand public sous forme de cartes et de bulletins de prévisions.



Exemple de bulletin prévisionnel local (meteofrance.com) en haut et situation météorologique de la France à droite (windy.com), le 27 novembre 2019 à 17 h 42.



Critères de comparaison	Climatologie	Météorologie
Objectifs	Décrire le temps moyen qu'il faisait sur une zone géographique donnée.	Prévoir le temps qu'il fera pour une zone géographique donnée.
Méthodes	Calculer des moyennes des grandeurs atmosphériques relevées en continu sur la zone ou déduites d'indicateurs variés (pollens, traces de glaciers, etc.).	Relever les grandeurs atmosphériques du jour sur la zone puis les introduire dans des modèles numériques « prédictifs ».
Périodes étudiées	Les trente dernières années (normales saisonnières) ou cent ans ou plusieurs millénaires.	Les jours, voire les deux ou trois semaines à venir, avec un maximum de fiabilité.

La température moyenne, indicateur essentiel du climat global



a Une des 28 stations météorologiques de haute montagne de Météo-France.

Depuis 1873, un réseau mondial de mesures météorologiques s'est peu à peu mis en place. Progressivement, les mesures devinrent plus nombreuses et de meilleure qualité grâce à l'utilisation d'un nombre croissant d'appareils au fonctionnement uniformisé. Ces relevés de température sont effectués par les stations météorologiques réparties à la fois sur les continents **(a)** et en mer. Actuellement, plus de 10 000 stations terrestres sont en activité alors qu'elles ne sont que 5 000 embarquées sur des navires marchands. Néanmoins, d'autres se trouvent sur des bouées dérivantes ou ancrées **(b)**. Enfin, divers satellites évaluent indirectement la température à partir de l'enregistrement du flux infrarouge émis par la surface terrestre. Des procédures statistiques permettent de déduire de l'ensemble de ces données un indicateur climatique majeur : la **température moyenne globale**.

b Bouée météoro-océanographique au large de Sydney, en Australie. ➤



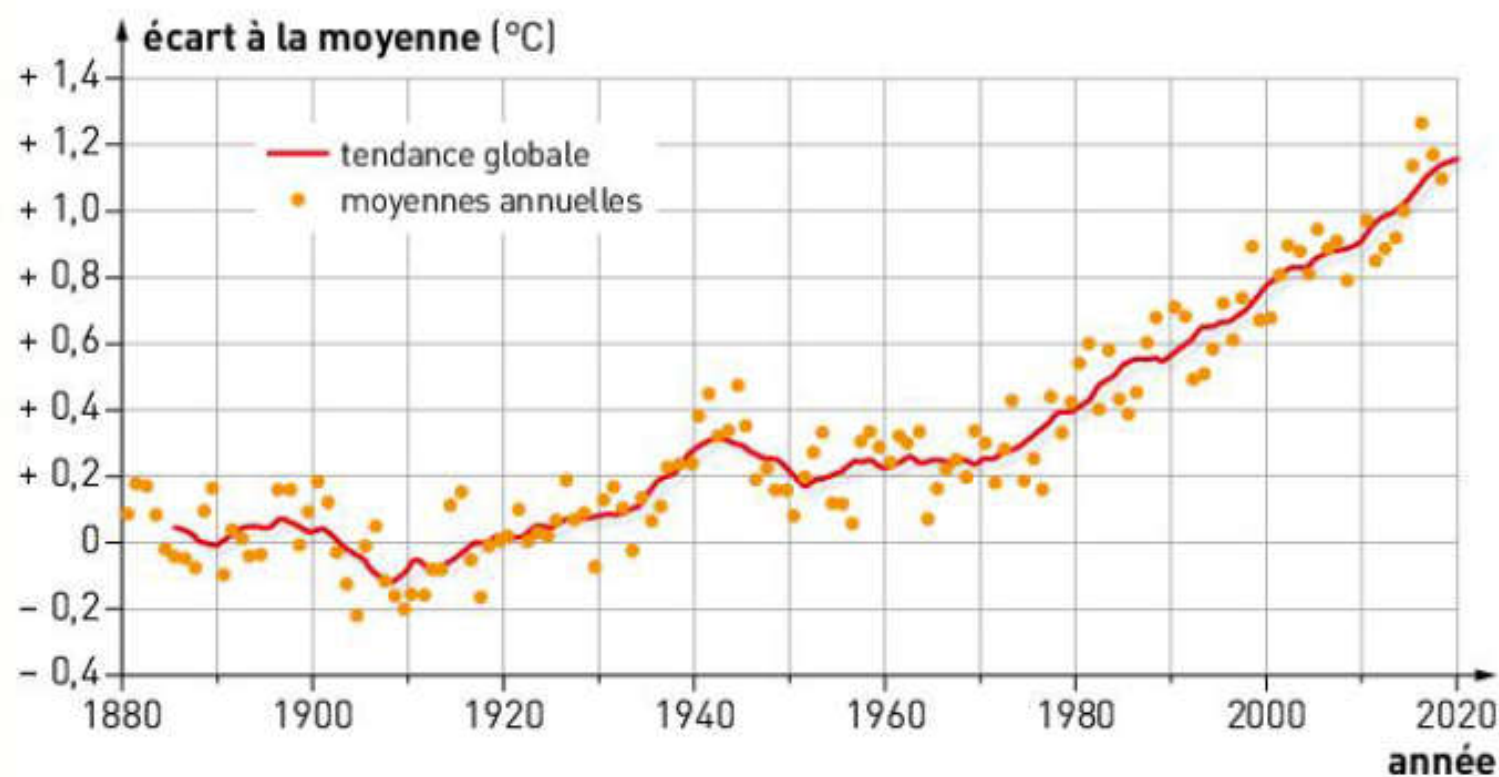
Les mesures permettant de calculer la température moyenne du globe de 1873 à nos jours se sont affinées car les points de mesure ont été multipliés dans de nombreux lieux (continents, océans), les appareils de mesures uniformisés et des technologies comme l'observation satellitaire de la Terre utilisées.

Évolution de la température moyenne globale depuis 1873

Les scientifiques étudient l'évolution de la température moyenne globale en la comparant aux valeurs moyennes de différentes périodes.

Par exemple, la courbe ci-contre prend comme niveau zéro la moyenne des années 1880 à 1920.

Ainsi, la température moyenne globale de l'année 1909 était de $0,2^{\circ}\text{C}$ inférieure à celle de la période 1880-1920.



■ Écarts de température globale par rapport à la moyenne 1880-1920 depuis 140 ans.

La lecture du graphique montre que la température moyenne globale fut globalement stable de 1880 à 1900 avant de connaître une baisse légèrement inférieure à 0,2 °C de 1900 à 1910.

Puis, de 1910 à 1940, on assiste à un réchauffement de 0,4 °C avant une période de légère baisse (0,1 °C), puis de stabilisation jusqu'en 1970.

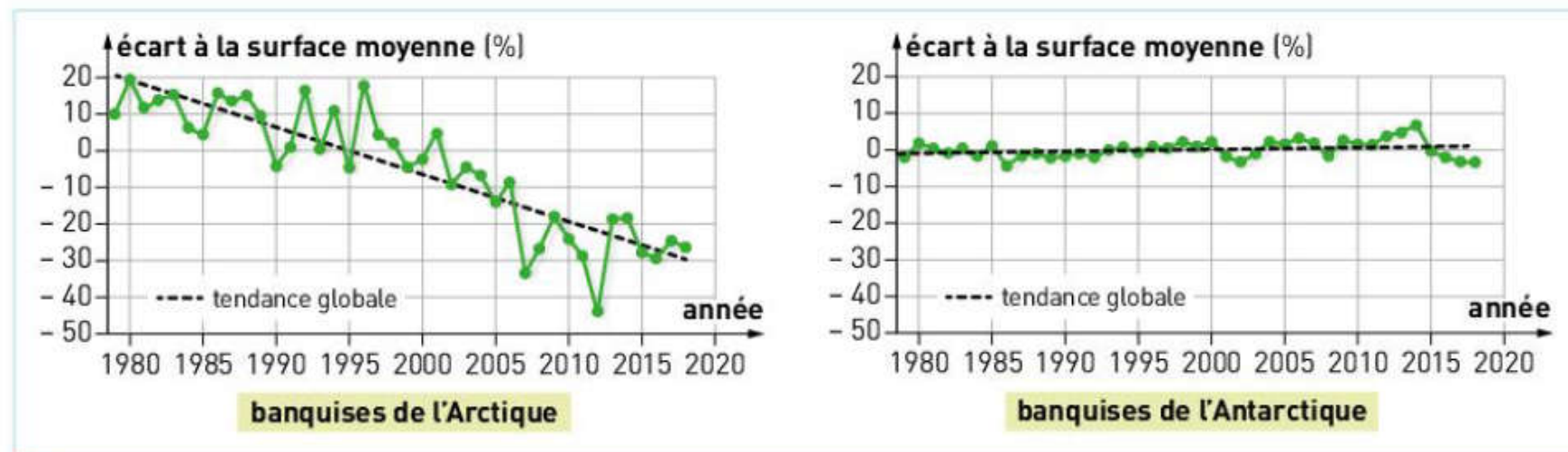
De 1970 à nos jours, l'écart de température par rapport à la moyenne de la période 1880-1920 augmente très rapidement de + 0,2 à + 1,1 °C, soit un gain de 0,9 °C sur cette période. Globalement, la température moyenne du globe est en hausse d'un peu plus de 1,2 °C de 1910 à 2019.

D'autres indicateurs climatiques

Les banquises* de l'Arctique et de l'Antarctique désignent une étendue de glace de mer formée par le gel de l'eau à la surface des océans. Cette formation a lieu lorsque la température atteint $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour les eaux de l'océan Arctique. Au fil des saisons, les banquises s'étendent en hiver et se réduisent en été (a). Malgré ces variations saisonnières, la surface des glaces de mer peut être mesurée d'une année sur l'autre à la même époque (b).



a Ours polaire sur la banquise arctique estivale disloquée.



b Variations de la surface des banquises de l'Arctique et de l'Antarctique en septembre par rapport à la surface moyenne de 1979 à 2018.

La mer de glace est le plus grand glacier* de France métropolitaine avec ses 12 km de long et une étendue de 28 km². Haut lieu touristique, cet amas de glace formé par l'accumulation de couches de neige s'amenuise. Entre 1912 et 2015, l'épaisseur du glacier est passée de 250 à 90 m sous la gare de Montenvers (G). Les océans recouvrent plus de 70,7 % de la surface terrestre. L'élévation du niveau marin moyen témoigne d'une variation du volume des océans qui dépend lui-même de la température de l'eau (d).



d Élévation du niveau des océans de 1993 à 2015. ➤

Trois autres indicateurs climatiques sont utilisés : la surface des banquises, celle des glaciers continentaux et le niveau moyen des océans.

La surface de la banquise arctique a diminué de 50 % alors que celle de la banquise antarctique est stable entre 1980 et 2015.

La superficie et l'épaisseur de la mer de glace ont baissé conjointement : de 1912 à 2015, le glacier a ainsi perdu 160 mètres d'épaisseur !

Le niveau moyen des océans s'est élevé de 8 cm au cours des 25 dernières années.

L'augmentation des valeurs de ces indicateurs climatiques confirme bien un réchauffement climatique global, même si ce dernier n'est pas attesté ici en Antarctique.

Un climat est défini par un ensemble de moyennes de grandeurs atmosphériques observées dans une région donnée pendant une période donnée.

Ces grandeurs sont principalement la température, la pression, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents.

La climatologie étudie les variations du climat local ou global à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires...).

La météorologie étudie les phénomènes atmosphériques qu'elle prévoit à court terme (jours, semaines).

La température moyenne de la Terre, calculée à partir de mesures in situ et depuis l'espace par des satellites, est l'un des indicateurs du climat global.

Il en existe d'autres : volume des océans, étendue des glaces et des glaciers...

→ Bilan 1 p 52

Pour aller plus loin

- « Climat d'hier à demain », Sylvie Joussaume, CNRS Éditions, 2003. L'auteure est climatologue et a participé à la rédaction de plusieurs rapports du GIEC.
 - « Météo. Comprendre les secrets du temps », Jacques Kessler, Éditions Balland/Jacob-Duvernet, 1999.
 - Un entretien accordé à la revue « La Recherche », n° 542, décembre 2018, par Valérie Masson-Delmotte paléoclimatologue et coprésidente du groupe 1 du GIEC, intitulé « Chaque demi-degré supplémentaire compte pour le climat. »
 - Un site incontournable avec ses multiples dossiers thématiques sur les climats et la météorologie : <http://www.meteofrance.com/accueil>
- Cinquième rapport du GIEC, 2014 ipcc.ch/report/ar5/syr
- Une recherche effectuée sur le site www.meteofrance.com donne les moyennes des températures (minimales, maximales) et précipitations mensuelles sous forme de graphique.
 - Le site <https://fr.weatherspark.com> précise la nébulosité, la direction et la force du vent ainsi que l'humidité relative. Il donne également les paramètres précédents.
 - Le site <https://www.infoclimat.fr> permet d'accéder aux paramètres précédents mais également à la pression atmosphérique depuis 1931 pour les mêmes jours de l'année.
 - <https://www.climatelevels.org/> qui permet d'analyser de façon dynamique l'évolution temporelle de différents paramètres climatiques et atmosphériques dont la température et le niveau marin
 - Afin de suivre « en direct » l'évolution des glaciers : le site du service d'observation Glacioclim <https://glacioclim.osug.fr> ou <http://www.ige-grenoble.fr/-glaciologie->
- Pour suivre celle des banquises : <https://www.climate.gov/>

II. La variabilité naturelle du climat

Problème posé : comment connaître les variations climatiques du passé ?
→ Répondez aux questions p 45 de votre livre.

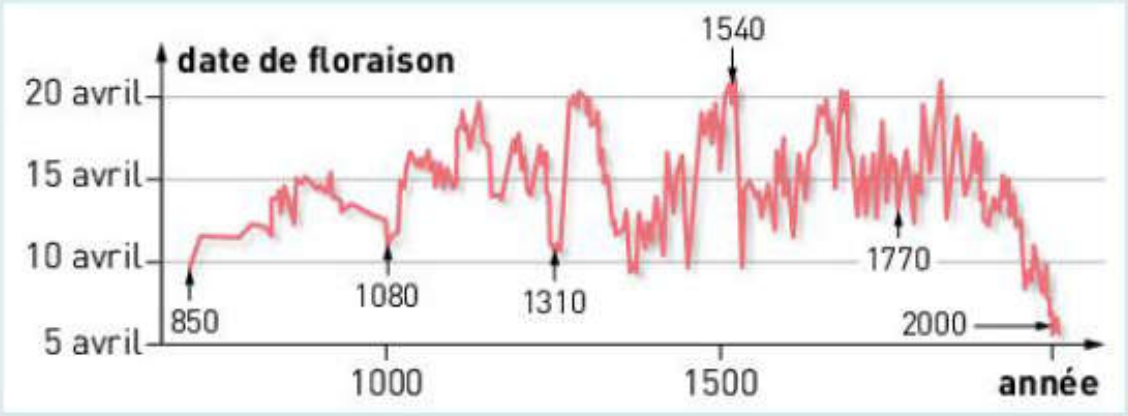
1. Montrez que le climat au Japon a varié au cours des derniers siècles.

DOC

1

Une variabilité visible sur quelques siècles

La coutume de pique-niquer sous les cerisiers en fleurs au Japon (a), appelée *hanami*, est très ancienne. Cette pratique est relatée par de nombreux écrits historiques. Ainsi, les dates de floraison des cerisiers sont bien connues pour ce pays depuis au moins l'an 850 (b).



◀ b Évolution de la date de floraison des cerisiers à Kyoto de 850 à 2 000.



Le document 1 présente l'évolution de la date de floraison des cerisiers à Kyoto (Japon).

Ces dates sont particulièrement bien relatées dans des écrits historiques du fait de la coutume de pique-niquer sous les cerisiers en fleur, appelée hanami en japonais.

« À partir de l'ère Heian (794-1191), les nobles, qui jusque-là, comme l'attestent de nombreux poèmes de l'époque, semblaient préférer les fleurs de pruniers, se mirent à admirer les cerisiers en fleurs.

Le premier hanami aurait été organisé par l'empereur Saga en 812, dans le jardin Shinsen-en de Kyoto »

(source <https://www.vivrelejapon.com/a-savoir/comprendre-le-japon/hanami-histoire-cerisiers-fleurs>).

Au cours des derniers siècles, la date de floraison des cerisiers a oscillé entre le 21 avril en 1540 et le 6 avril en 2 000.

Elle avait lieu à Kyoto entre le 10 et le 20 avril lors du dernier millénaire mais elle se déroule entre le 05 et le 10 avril depuis plus de 30 ans.

La précocité accrue de cette floraison accrédite l'existence d'un réchauffement climatique actuel qui impacte le vivant.

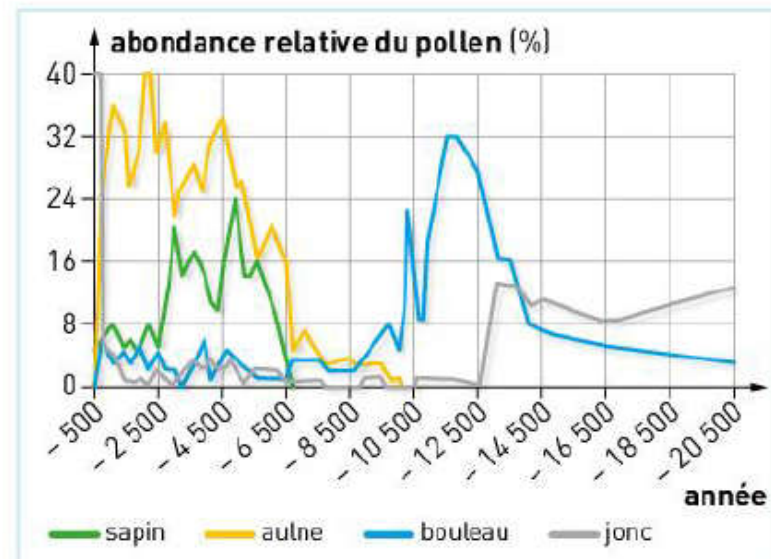
2. Reconstituez les étapes majeures de l'évolution du climat dans la région d'Amsoldingen entre - 20 000 et - 500 ans

DOC
2

Une variabilité à l'échelle de plusieurs millénaires

À la belle saison, les plantes à fleurs libèrent de grandes quantités de grains de pollen. Entourés par une enveloppe imputrescible*, ces derniers ne se décomposeront pas s'ils tombent au fond d'un lac, milieu propice à leur conservation. Le prélèvement des sédiments lacustres permet de reconstituer la variation au cours du temps de l'abondance des pollens sous la forme de diagrammes polliniques (a). Chaque espèce végétale produisant un grain de pollen qui lui est spécifique, on en déduit les espèces présentes à chaque période. Connaissant leurs préférences de température et d'humidité, les changements climatiques au cours d'une période donnée peuvent être reconstitués (b).

Plantes	Préférences climatiques
sapin	climat froid à tempéré, humide
aulne	climat tempéré, zones humides
bouleau	climat froid, sec ou humide
joncs	climat froid et humide



a Diagrammes polliniques du site d'Amsoldingen (Suisse), obtenu avec le logiciel *Paléobiome 2*.



b Préférences climatiques des quatre plantes et leur grain de pollen colorisé artificiellement.

Le document 2 concerne l'étude de l'évolution du climat depuis 20 000 ans à partir des grains de pollen trouvés dans les sédiments des lacs, notamment ceux du Jura et de Suisse.

La comparaison de l'évolution de l'abondance relative de chaque type de pollen (doc. 2a) avec les préférences climatiques des espèces correspondantes (doc. 2b) permet de reconstituer l'histoire climatique de la région étudiée.

Entre – 20 000 ans et environ – 13 000 ans, les pollens des joncs et des bouleaux sont présents, ce qui indiquent un climat froid et humide (joncs majoritaires).

Puis, de – 13 000 à – 11 500 ans, l'abondance des pollens des joncs s'effondre alors que celle des bouleaux augmente fortement.

Cela traduirait un climat toujours froid mais plus sec.

De – 11 500 à – 8 500 ans, on constate une régression de l'abondance des pollens de ces deux espèces.

Les pollens de sapin (+ de 20 %) et d'aulne (+ de 30 %) deviennent ensuite dominants entre – 8 500 ans et – 500 ans.

Les données palynologiques traduisent donc un réchauffement climatique à partir de – 11 500 ans conduisant à un climat tempéré humide.

3. Montrez que l'évolution des températures sur le continent Antarctique varie de façon cyclique depuis 800 000 ans.

DOC

3

Une variabilité cyclique sur le dernier million d'années

Les prélèvements réalisés dans les calottes* glaciaires permettent d'accéder à de très anciennes glaces. Ainsi, un carottage* de 3,2 km de profondeur, réalisé en Antarctique au Dôme C (a), a permis de prélever en continu des glaces ; les plus profondes, donc les plus anciennes, ayant 800 000 ans.

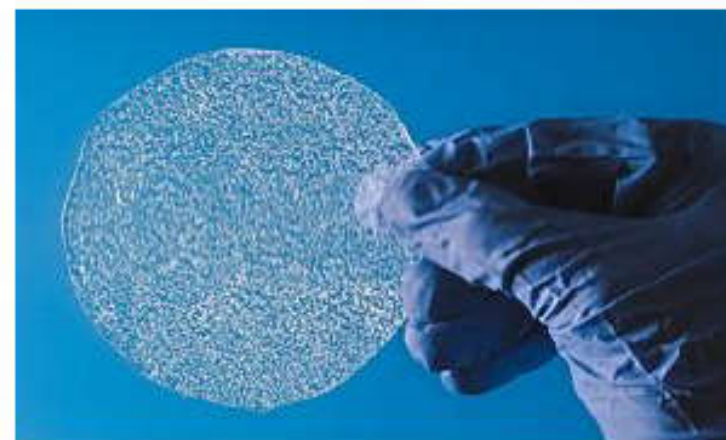
Des analyses de ces carottes de glace (b) ont été pratiquées soit sur la glace elle-même, soit sur les bulles d'air emprisonnées dans cette glace (c).



a Situation géographique du forage.



b Carotte de glace.

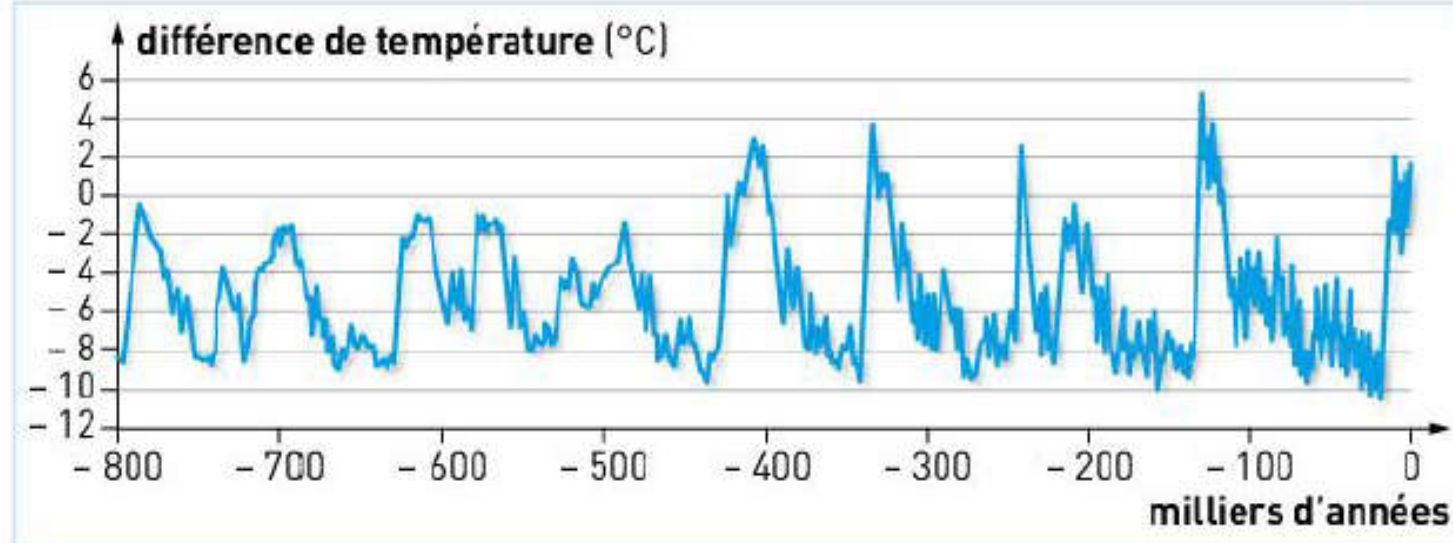


c Bulles d'air dans la glace arctique.

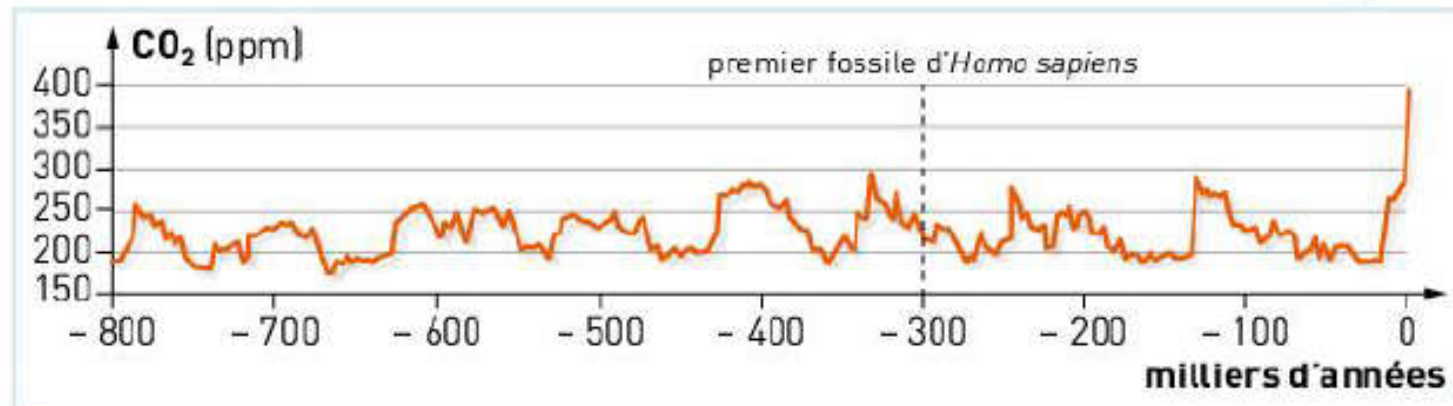
L'étude de l'eau constituant la glace permet de retrouver la paléotempérature* de l'atmosphère au moment de la formation de cette glace. En effet, les atomes d'oxygène composant les molécules d'eau H_2O existent sous deux formes isotopiques, majoritairement ^{16}O et minoritairement ^{18}O , dont les quantités varient d'une année sur l'autre en fonction de la température. La proportion de ces deux isotopes permet d'obtenir la température atmosphérique au moment de la précipitation (d).

L'analyse des bulles d'air piégées permet de retracer l'évolution de la concentration de certains gaz atmosphériques : dioxyde de carbone (e), méthane...

À noter que le taux de CO_2 a franchi le cap des 400 ppm* pour la première fois depuis 800 000 ans en 2014.



d Évolution de la température par rapport à la moyenne des 1 000 dernières années depuis 800 000 ans.



e Taux de CO_2 depuis 800 000 ans.

Le document 3 montre des études glaciologiques réalisées en Antarctique au dôme C tant sur la glace elle-même, que sur les bulles d'air contenues (docs. 3a à c).

On observe une corrélation entre l'évolution de la température déduite de ce paléo thermomètre, (doc. 3d) avec l'évolution de la teneur en CO₂ mesurée au sein des bulles d'air de la glace (doc. 3e).

Peu après – 800 000 ans, on constate une augmentation « rapide » des températures de + 8 °C. Puis, ces dernières baissent de manière irrégulière et progressive jusqu'à – 700 000 ans et retrouvent leur niveau initial.

Ce phénomène est identifiable 8 fois entre – 800 000 ans et actuellement avec une périodicité d'environ 100 000 ans.

Il s'agit donc bien d'un cycle qui se répète sur la période étudiée.

Ce cycle n'est cependant pas « parfait » dans sa durée et ses variations de température.

4. Comparez les variations de température avec les variations du taux de CO₂ depuis 800 000 ans. Quelles relations hypothétiques peut-on émettre entre ces deux indicateurs.

Un « pic » d'augmentation des températures coïncide toujours avec un « pic » d'augmentation du taux de dioxyde de carbone atmosphérique, de même pour une baisse. Il y a bien une corrélation entre ces deux paramètres.

Sachant que le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre, on peut formuler l'hypothèse que l'accroissement du taux atmosphérique de ce gaz provoque un réchauffement global.

On peut aussi émettre l'hypothèse que le réchauffement provoque une libération de CO₂ dans l'atmosphère à partir des océans.

Le climat de la Terre présente une variabilité naturelle sur différentes échelles de temps.

Toutefois, depuis plusieurs centaines de milliers d'années, jamais la concentration du CO₂ atmosphérique n'a augmenté aussi rapidement qu'actuellement.

→ Bilan 2 p 52