

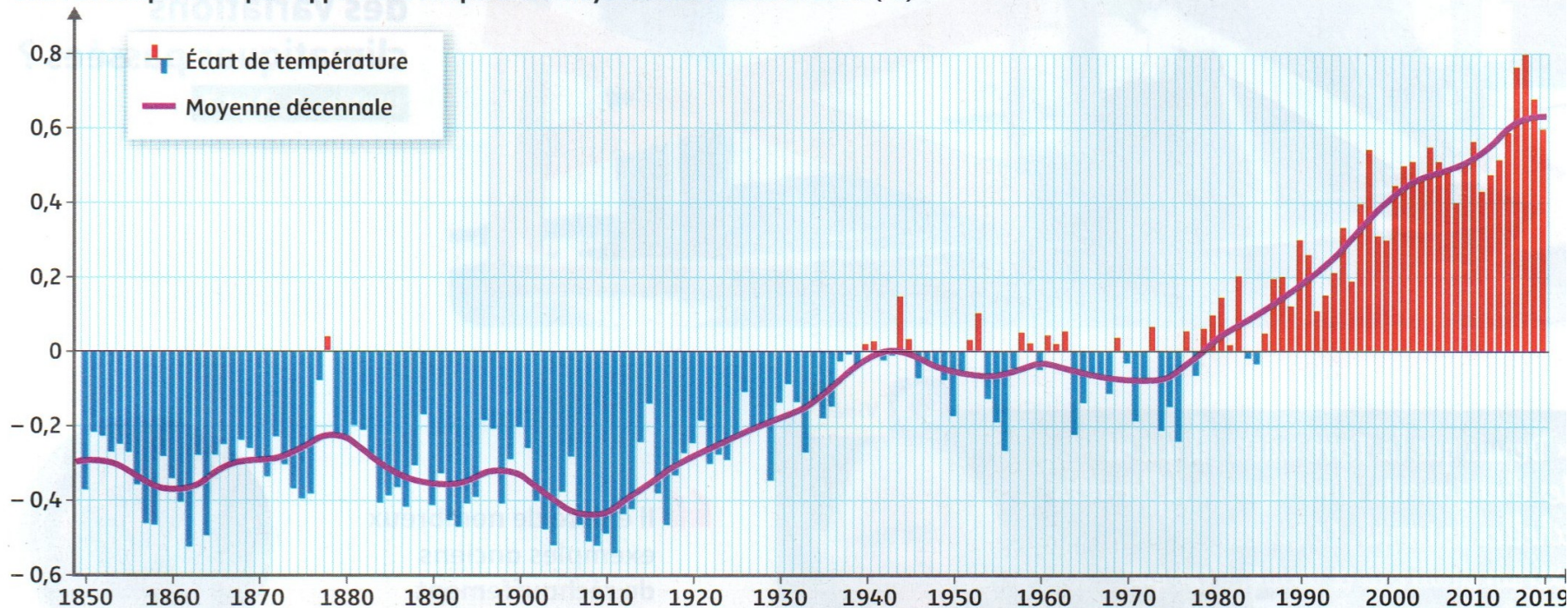
Les climats de la Terre : Comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Reconstituer et comprendre les variations climatiques



McCarty Glacier (Alaska), en 1909 et 2004
Les arbres ont remplacé la glace

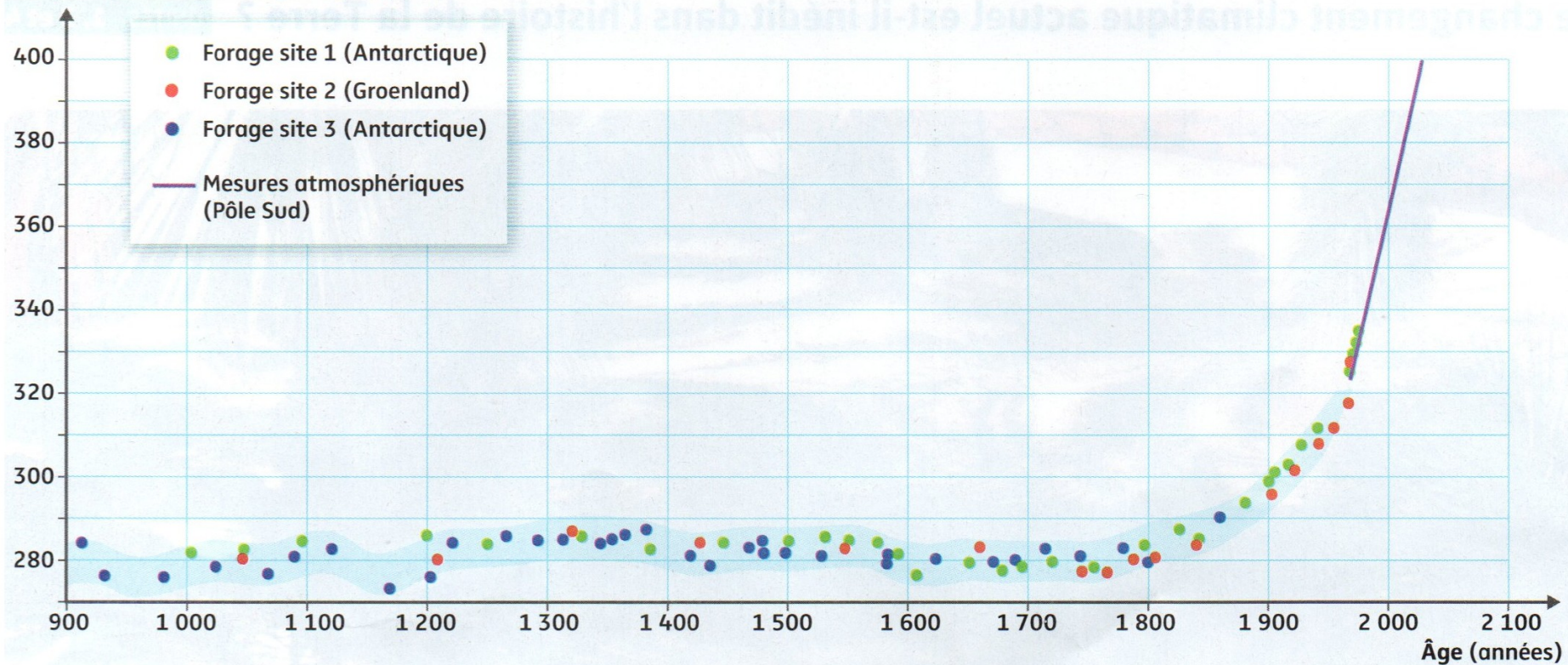
Écart de température par rapport à la température moyenne entre 1961 et 1990 (°C)



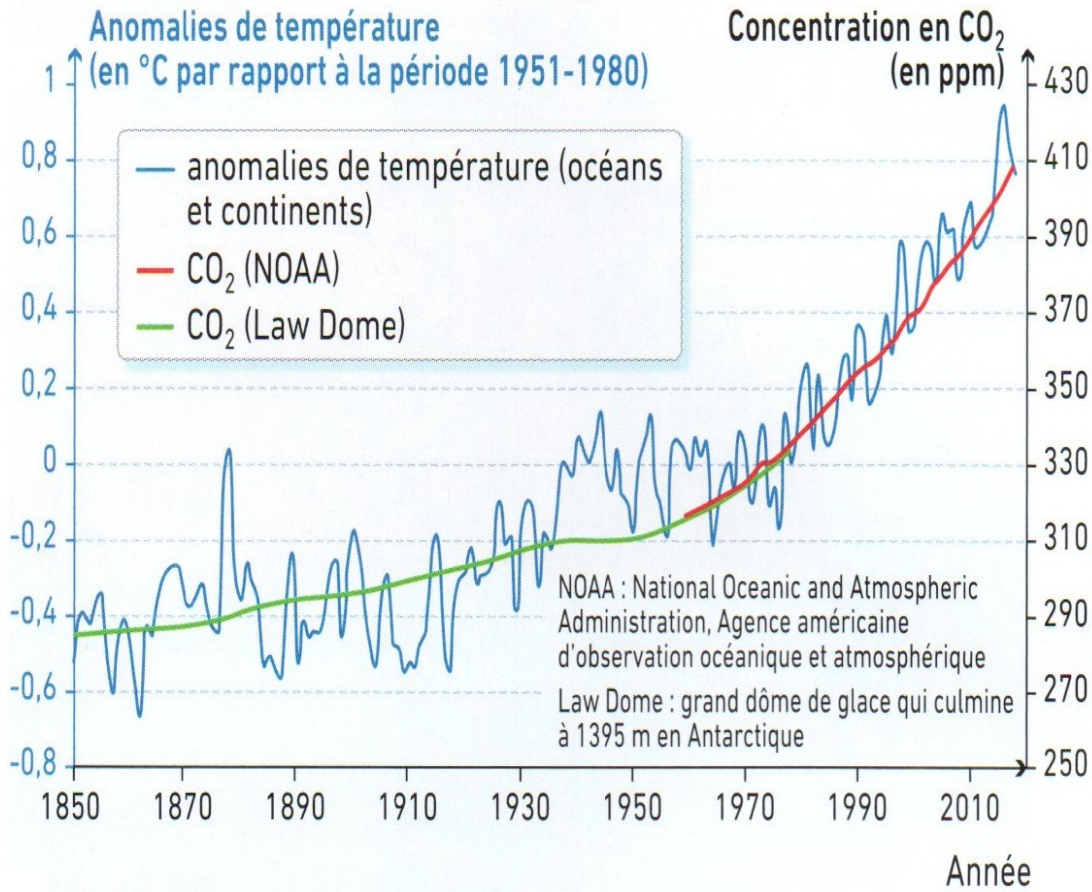
Évolution de la température mondiale depuis 1850. Température moyenne annuelle de l'air depuis 1850 par rapport à la moyenne des températures atmosphériques mesurées au sol sur la période 1961-1990. Le zéro correspond à cette moyenne, soit 14,0 °C.

(Nathan, Ed. 2020, p.240)

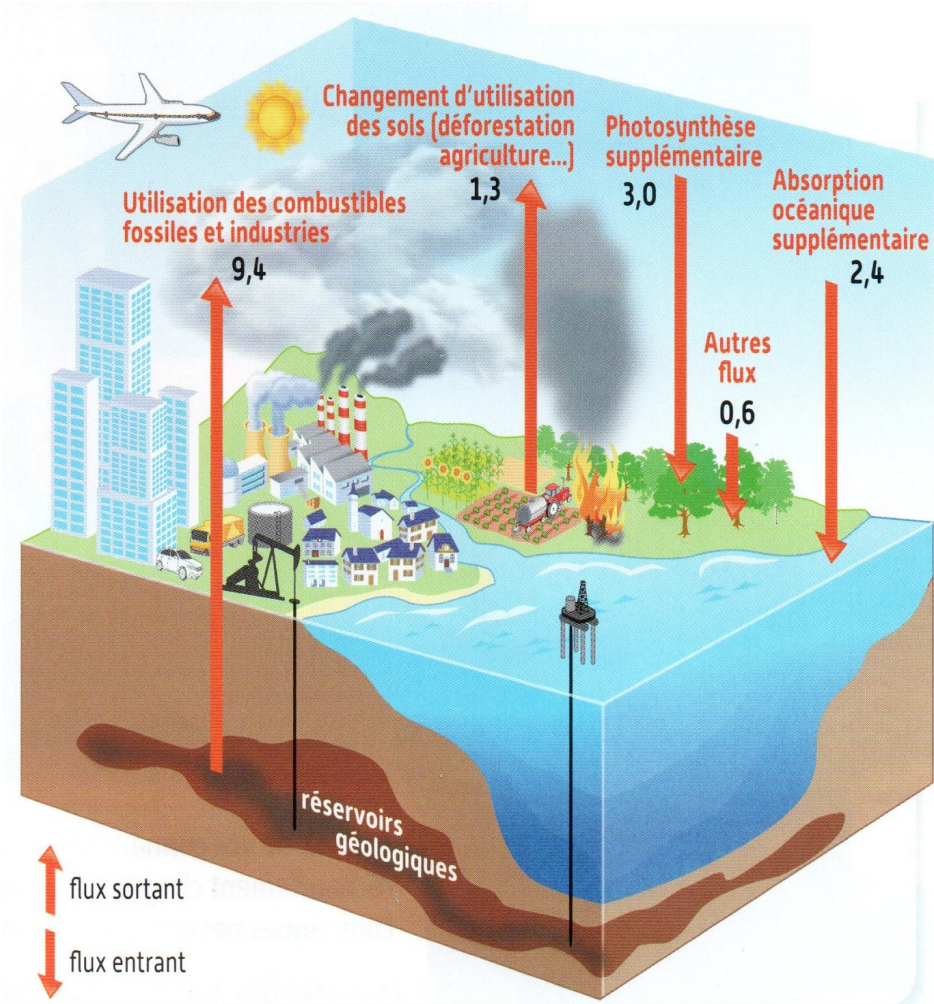
Proportion de CO₂ atmosphérique (ppm)



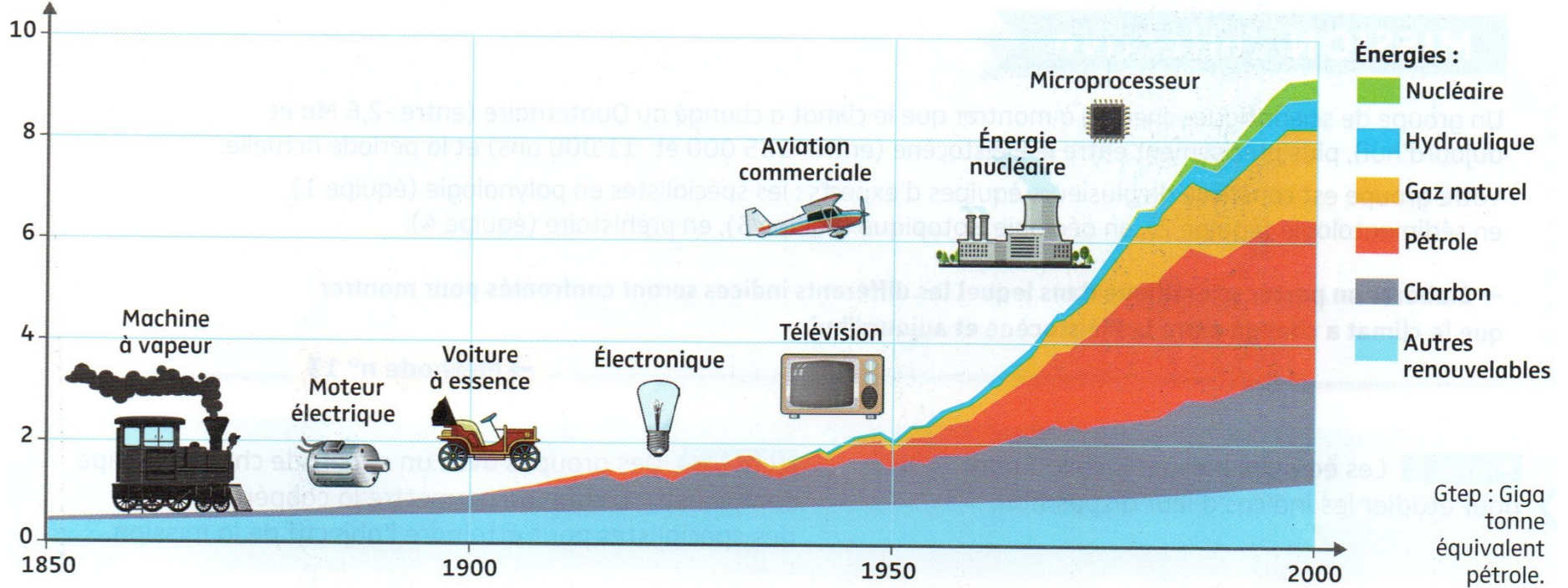
Évolution de la proportion de CO₂ dans l'atmosphère depuis l'an 900 (en ppm). Les mesures en continu de la proportion en CO₂ atmosphérique ont commencé en 1958. Les données avant 1958 ont été obtenues à partir de l'étude des bulles d'air contenues dans les glaces. L'unité ppm signifie « partie par million ». Ainsi, une proportion de 200 ppm de CO₂ dans l'air signifie que pour 1 million de molécules d'air, il y a 200 molécules de CO₂. (Nathan, Ed. 2020, p.240)



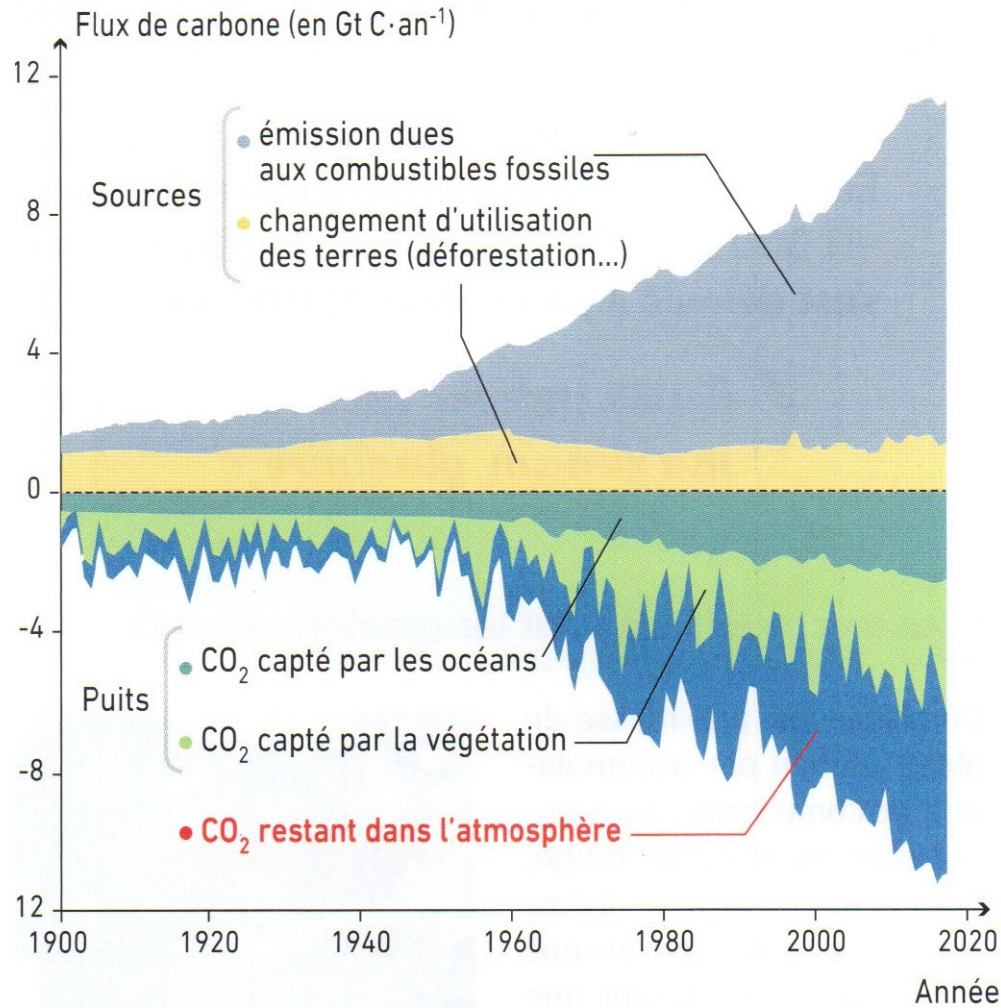
Anomalies moyennes globales de température et concentration en CO₂ atmosphérique depuis 1850.



Consommation mondiale d'énergie (Gtep)

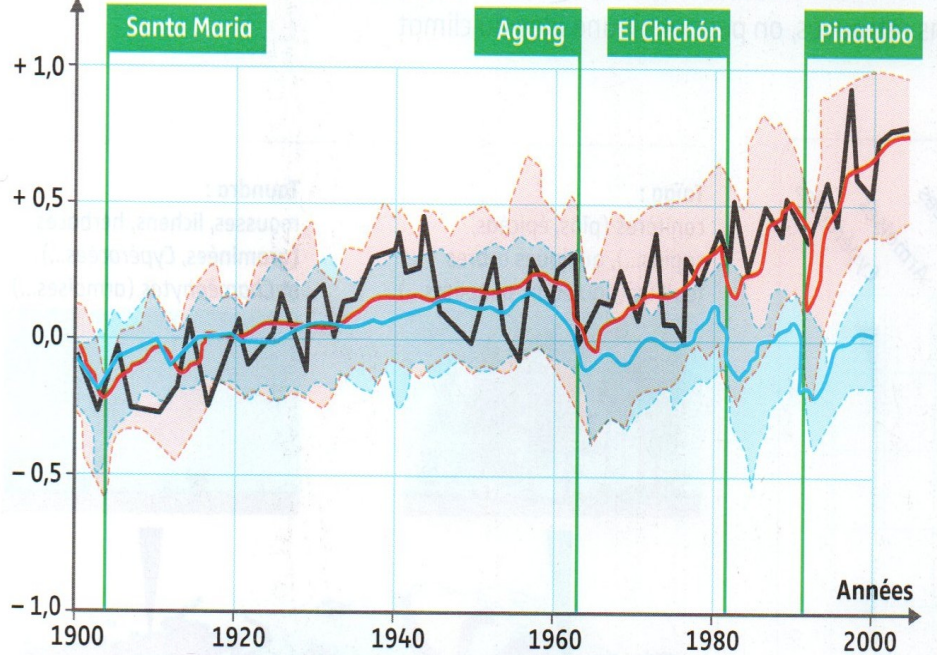


Evolution de la consommation mondiale d'énergie au cours du temps (et dates de quelques innovations technologiques majeures). Exemple de la réaction de combustion du méthane (CH_4), principal composé du gaz naturel : $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

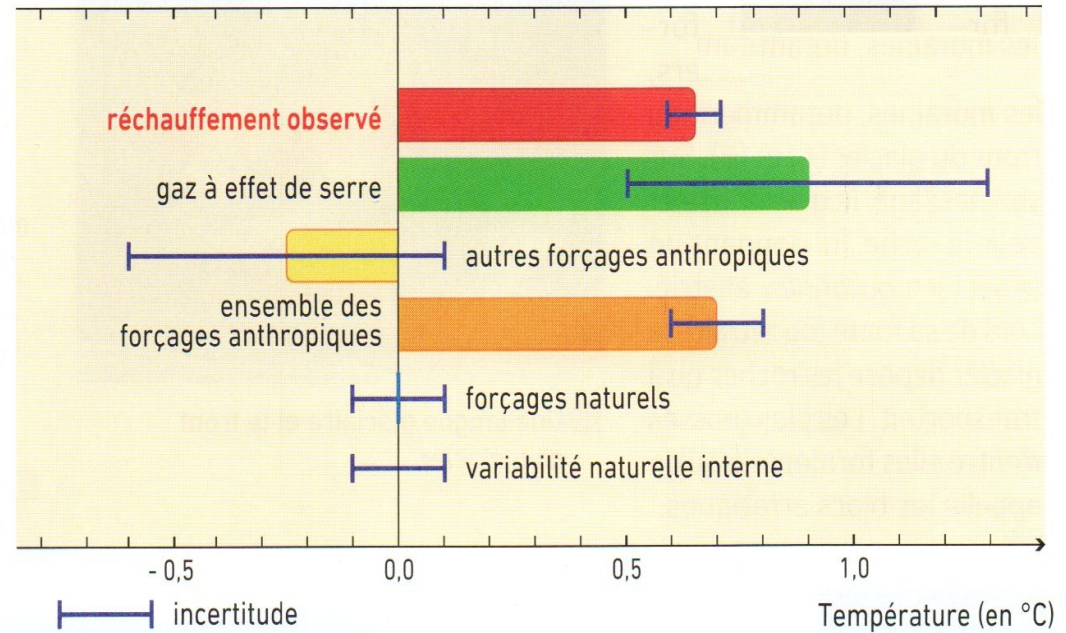


Évolution des sources et des puits de carbone depuis 1900.

Écart de température par rapport à la température moyenne entre 1880 et 1920 (°C)



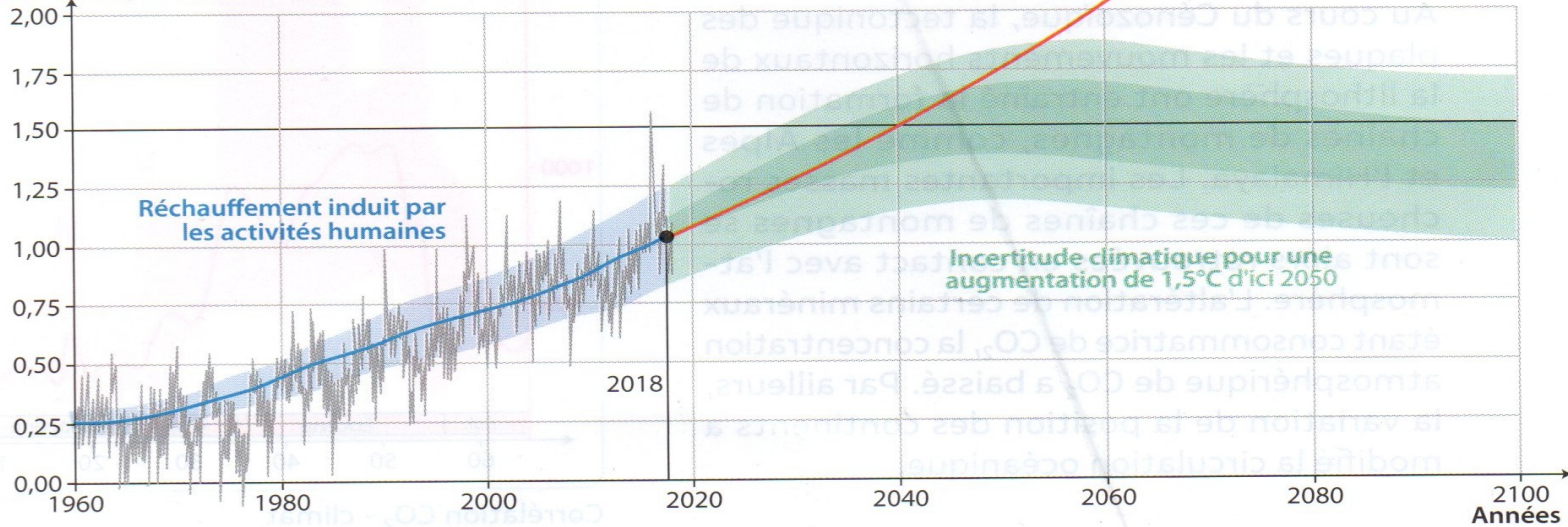
(Nathan, Ed. 2020, p.241)

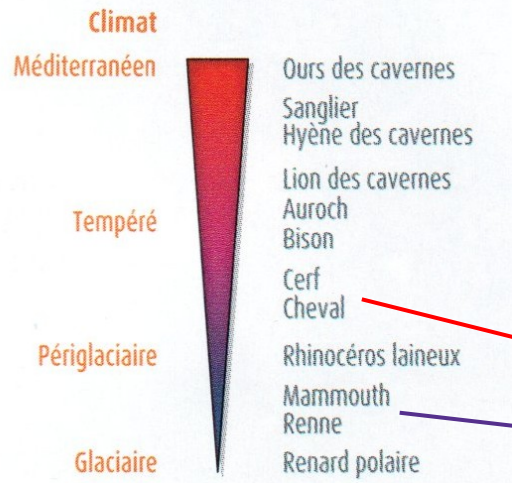


Contribution au changement observé de la température de surface entre 1951 et 2010 pour différents types de forçages. Ces estimations sont obtenues à partir d'une combinaison d'observations et de simulations par des modèles climatiques.

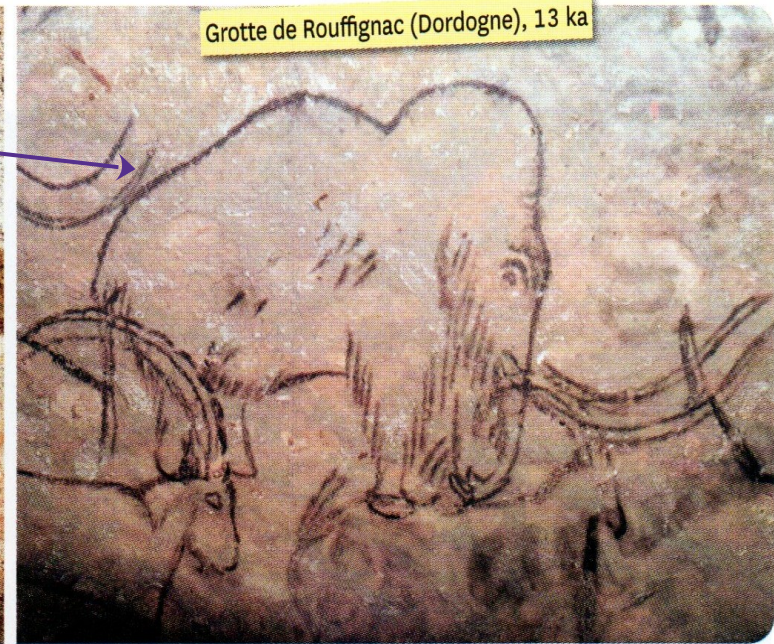
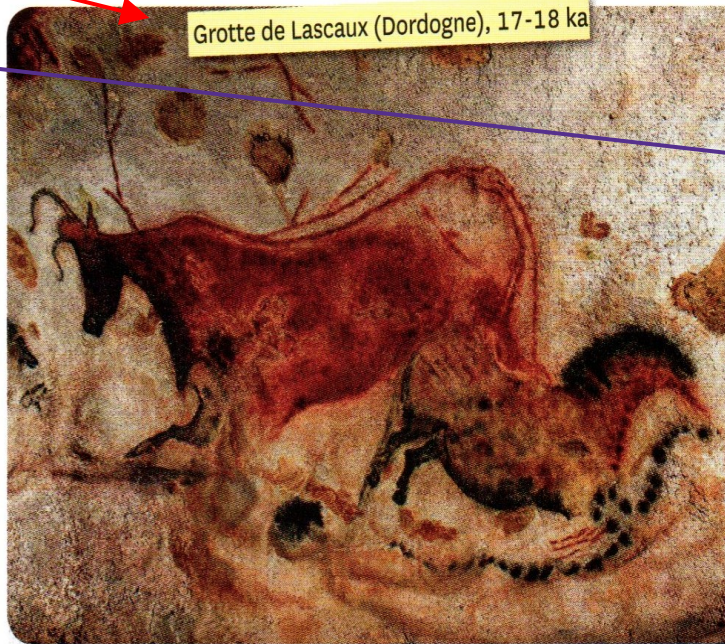
(Bordas, Ed. 2020, p.293)

Changement de la température globale relative à la période 1850-1900 (°C)





Les variations climatiques pendant le quaternaire



Deux exemples d'art rupestre. ka : milliers d'années.



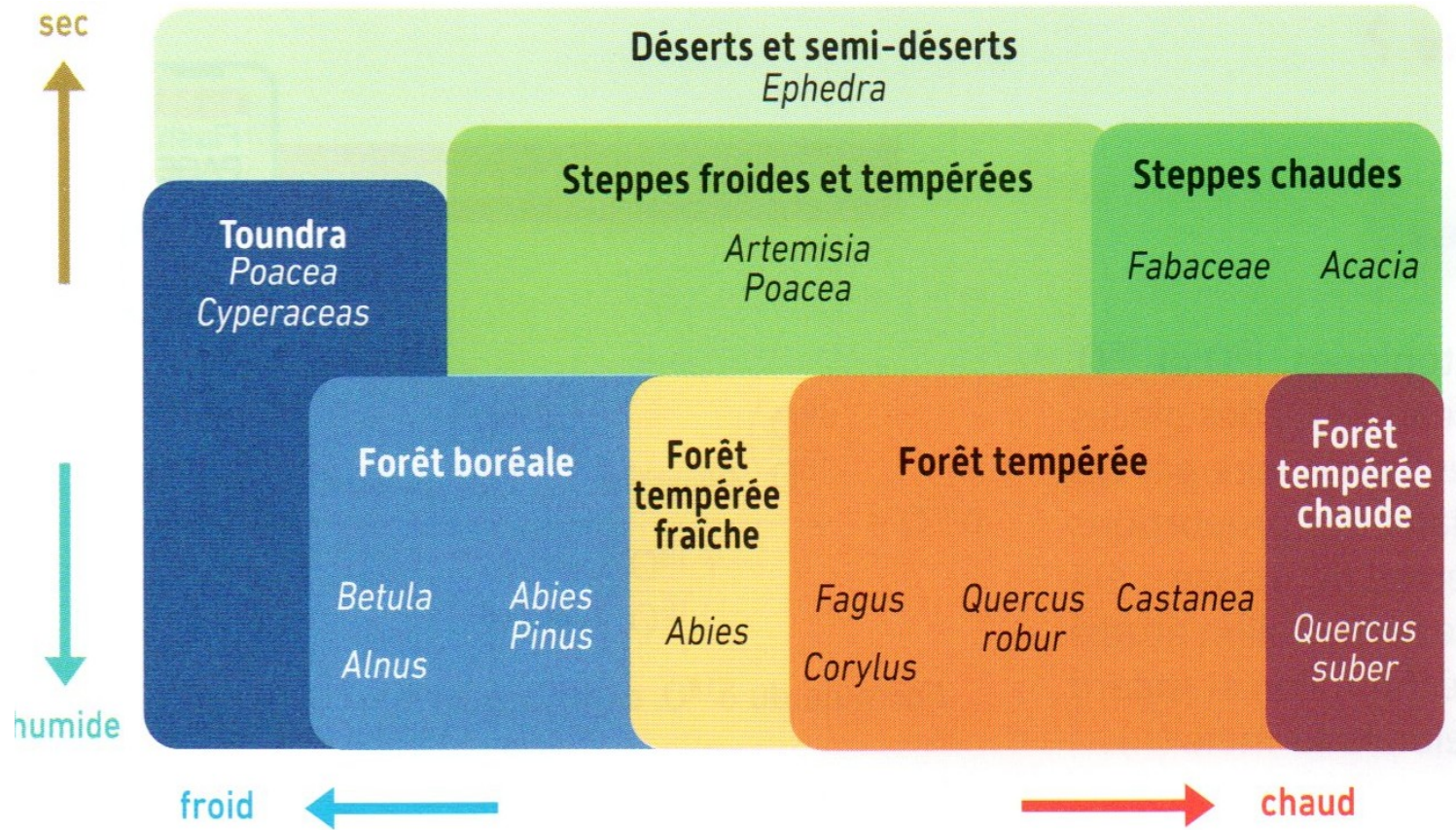
Des alternances climatiques enregistrées dans les grottes

La grotte du Lazaret s'est formée par dissolution des carbonates. De nombreux éléments de l'environnement s'y sont accumulés et ont ainsi enregistré le biome.

Niveaux	Age (ka)	Pollens	Ossements d'animaux	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
C3 sup.	125	Arbres feuillus, plantes méditerranéennes	Cerfs, chevreuils	- 2
C3 moy.	150	Poacées	Bouquetins, rennes, chamois	+ 1,5
C3 inf.	158	Arbres feuillus, plantes méditerranéennes	Cerfs, chevreuils	+ 1
C2 sup.	170	Arbres	<i>Homo prénéanderthaliens</i> , amphibiens, loups, panthères, lynx, cerfs, bisons, lapins	+ 0,2
C2 inf.	200	Poacées	<i>Homo prénéanderthaliens</i> , cerfs, bouquetins, éléphants antiques, rennes, chamois, loups, ours, lynx, renards, lapins	+ 1,6
B	230			0
A	337			+ 1

▲ Contenu de différentes couches étudiées dans le sol de la grotte du Lazaret. Le $\delta^{18}\text{O}$ est celui des coquilles de mollusques marins trouvés dans la grotte

(Belin, Ed. 2020, p.314)



Les associations végétales typiques des différents biomes.

(Bordas, Ed.2020, p.297)

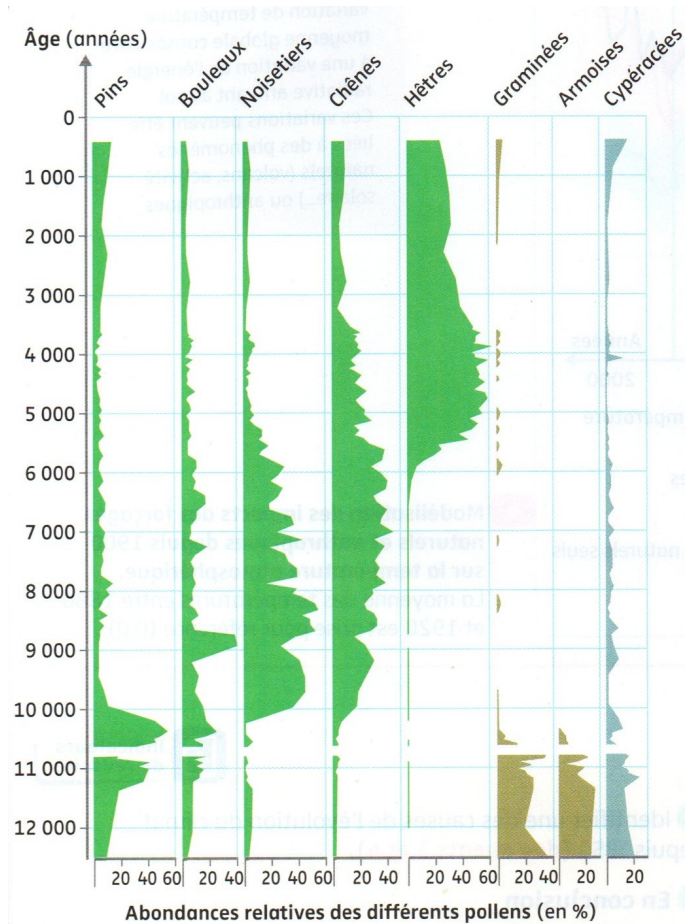
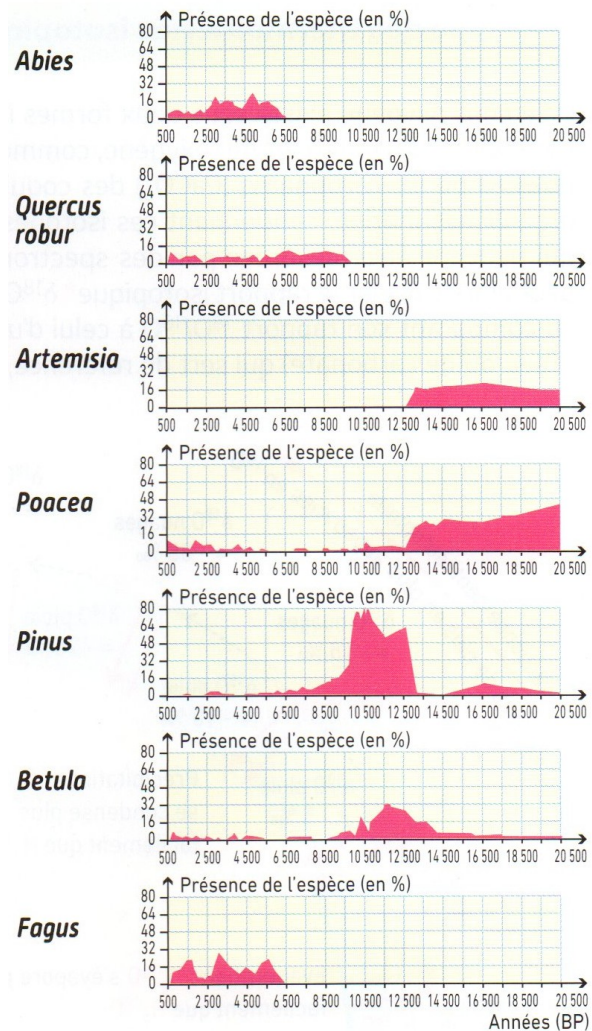
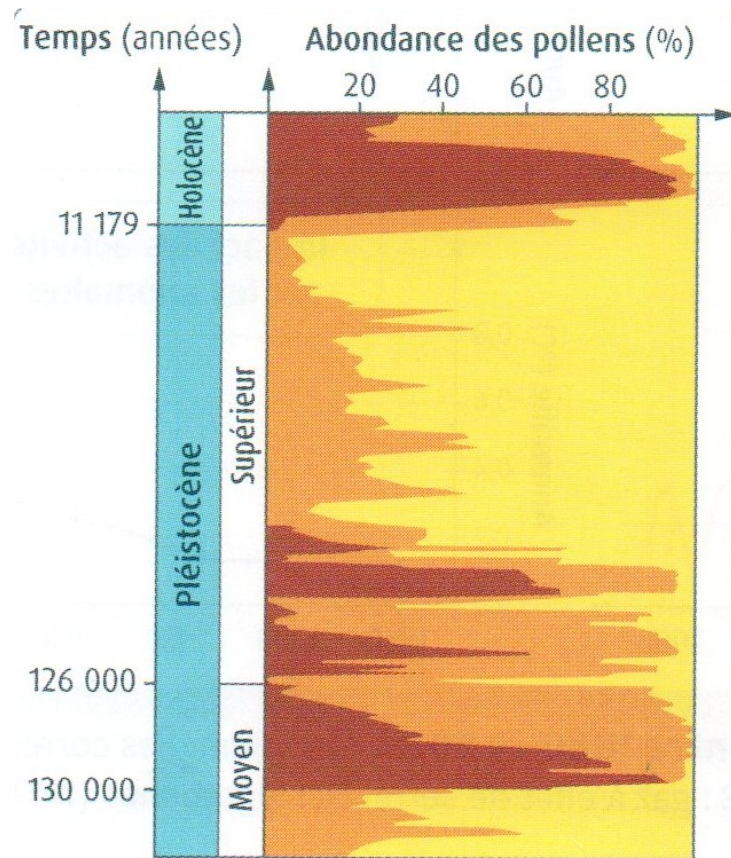


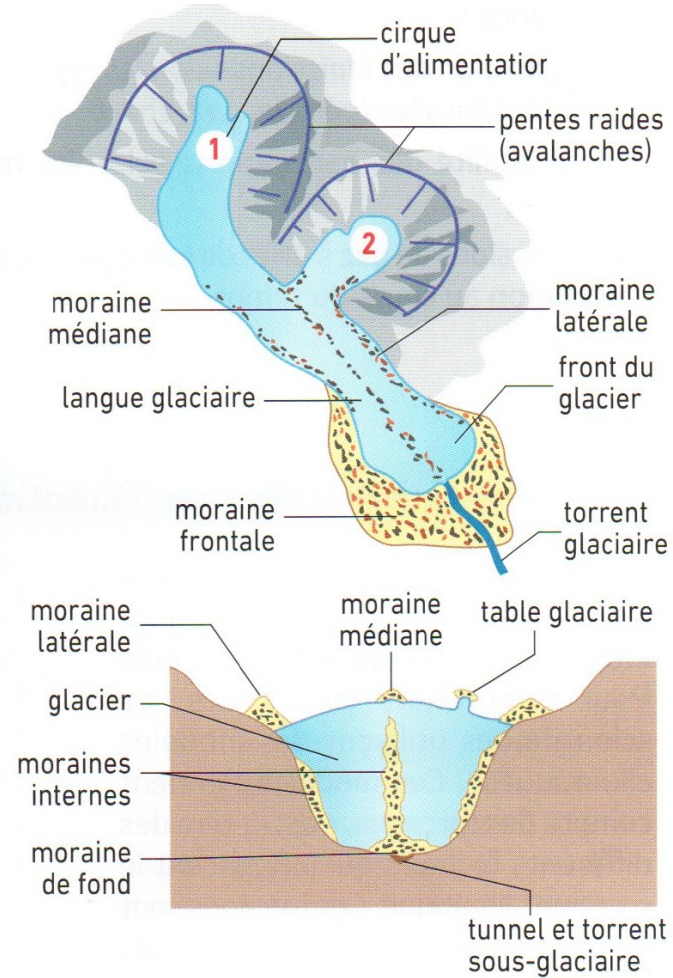
Diagramme pollinique de la tourbière
de la Grande Piles (Vosges)



- Pollens de plantes herbacées (poacée, armoise)
- Pollens de bouleau, de saule et d'épicéa
- Pollens de chêne, de hêtre et de noisetier



A Une langue glaciaire et le front d'un glacier.



B Schéma d'un glacier, vu de haut et en coupe transversale.

(d'après Bordas, Ed. 2020, p.294)



Exemple de vallée en U



(d'après Bordas, Ed. 2020, p.295)

Exemple de bloc erratique



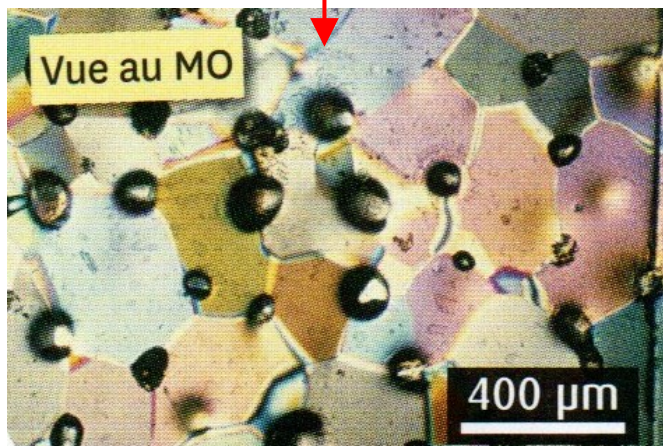
(Moraine du glacier de Moiry en Suisse, Nathan, Ed.2020, p243).



Exemple de moraines glacières

Les glaciers des Alpes au maximum de la glaciation de Würm, il y a 40 000 ans





Carotte de glace

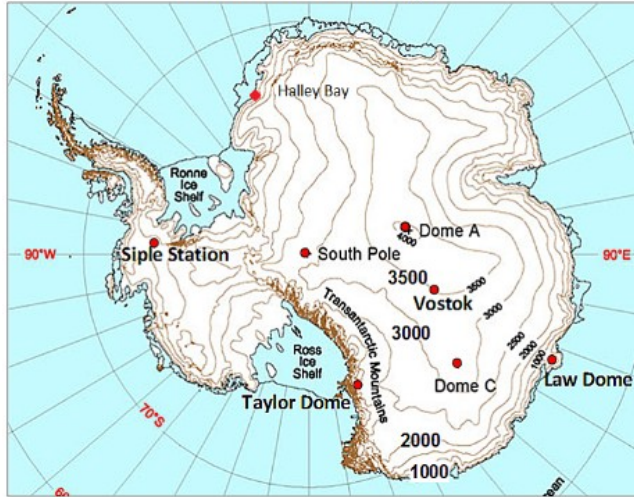
(Belin, Ed. 2020, p.299)



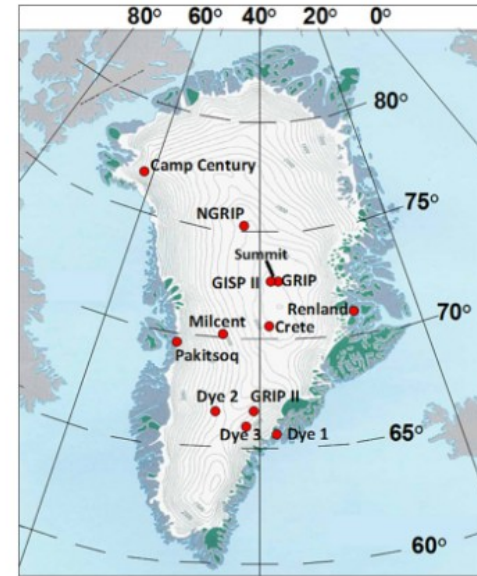
Carotte de glace en Antarctique.
Le $\delta^{18}\text{O}$ est calculé à partir de carottages.

(Nathan, Ed. 2020, p.244)

Vostok en Antarctique



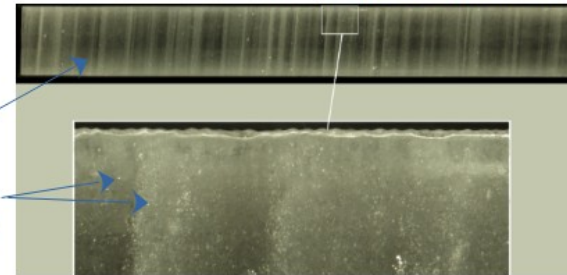
Summit dans le Groenland



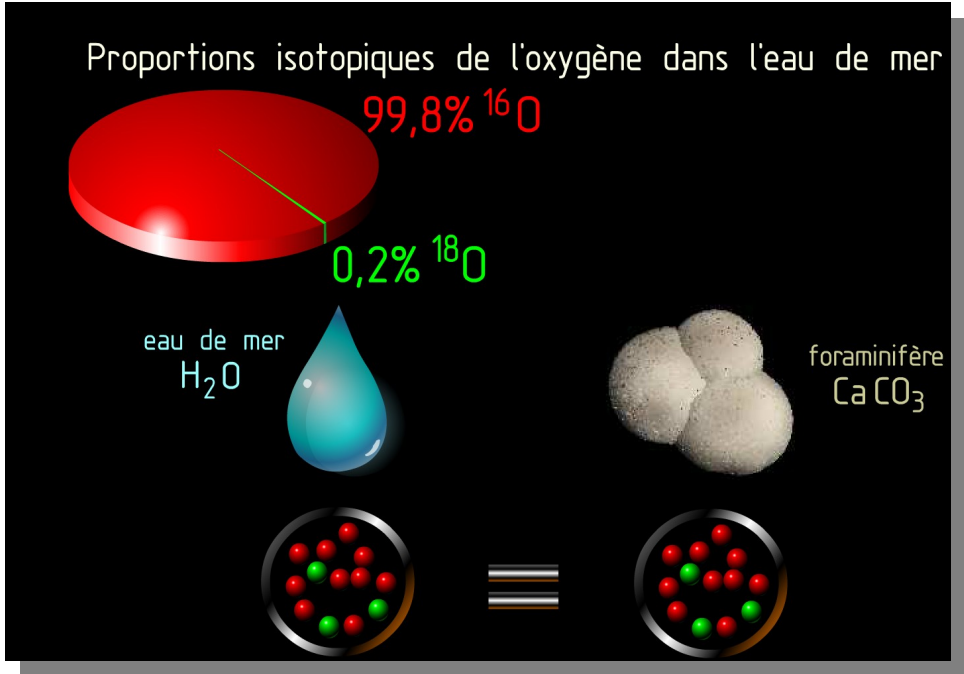
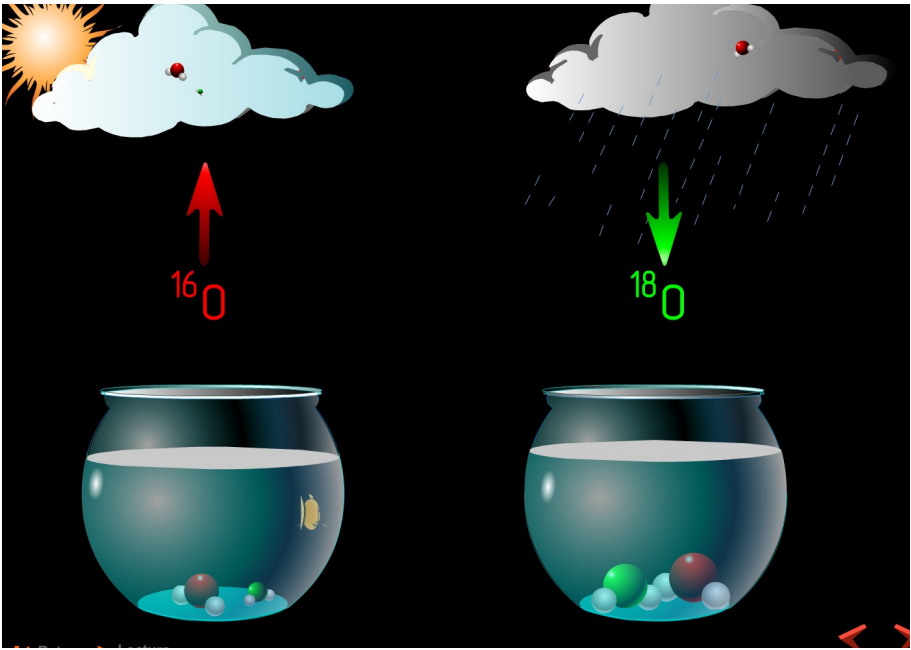
Carotte de glace (<https://www.simplvscience.ch/>)

Ces deux stations étudient les carottes de glace, ces dernières fournissent 3 précieux indices pour les paléoclimatologues :

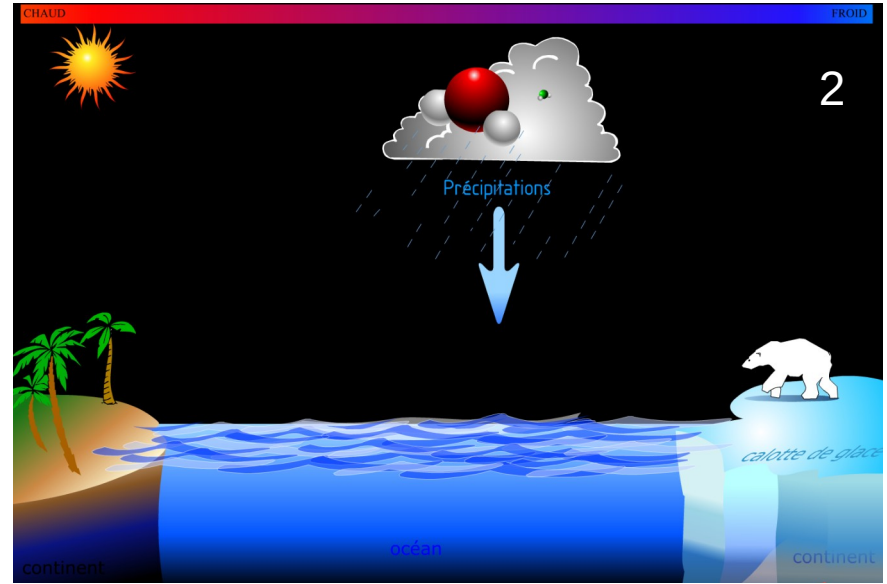
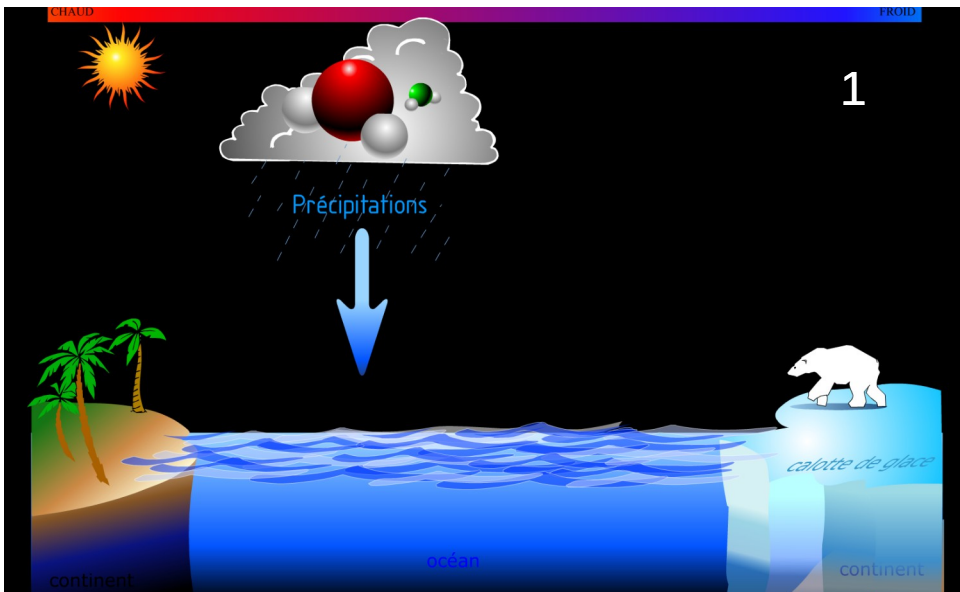
- les stries annuelles permettent une datation assez fine des échantillons
- Les bulles d'air piégées par la glace permettent de connaître la teneur des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) de l'atmosphère au moment du dépôt.
- Les rapports isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène composant les molécules d'eau de la glace.



$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ échantillon}}{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ standard}} - 1 \right) \times 1000$$

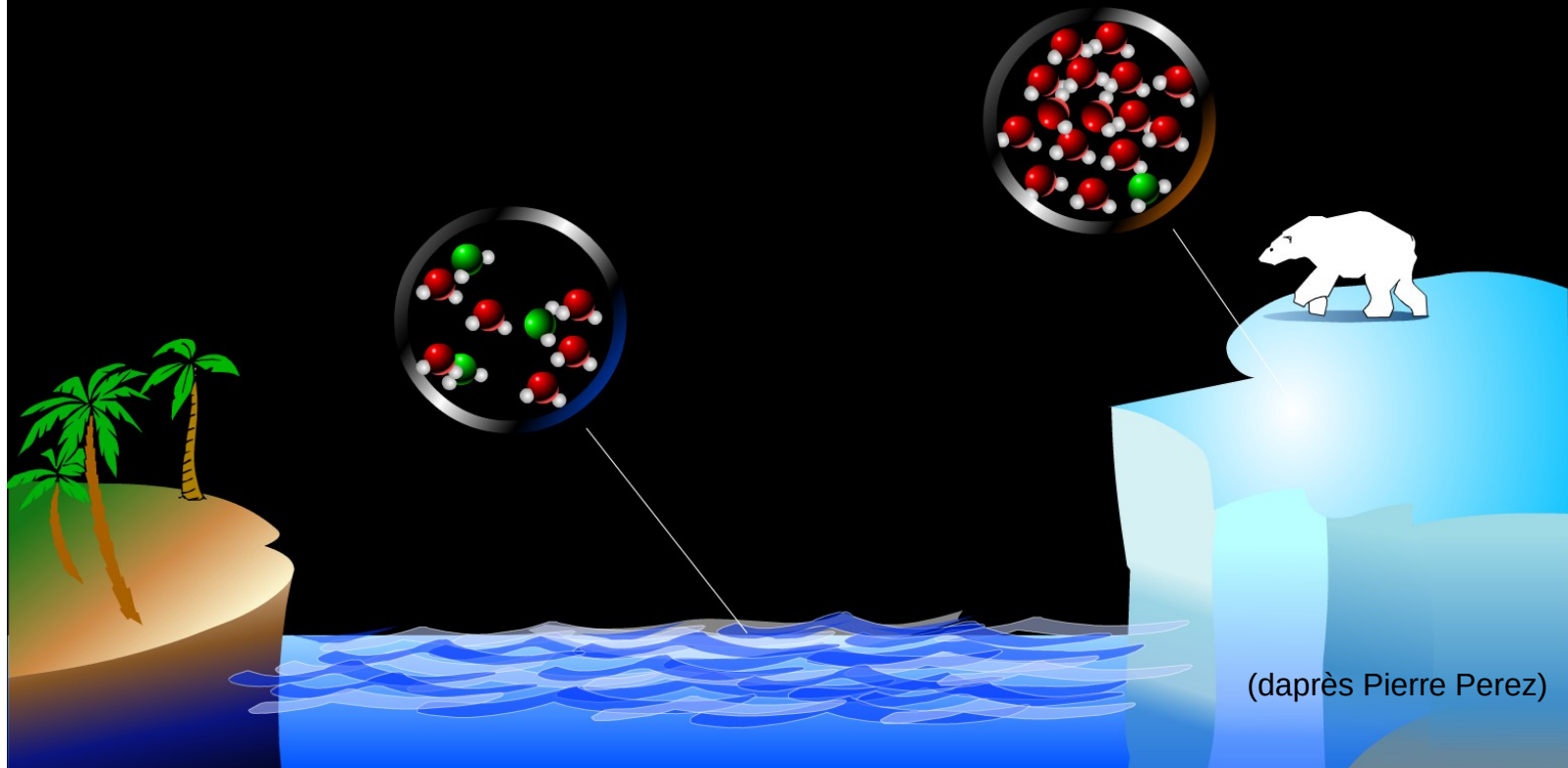


(daprès Pierre Perez)

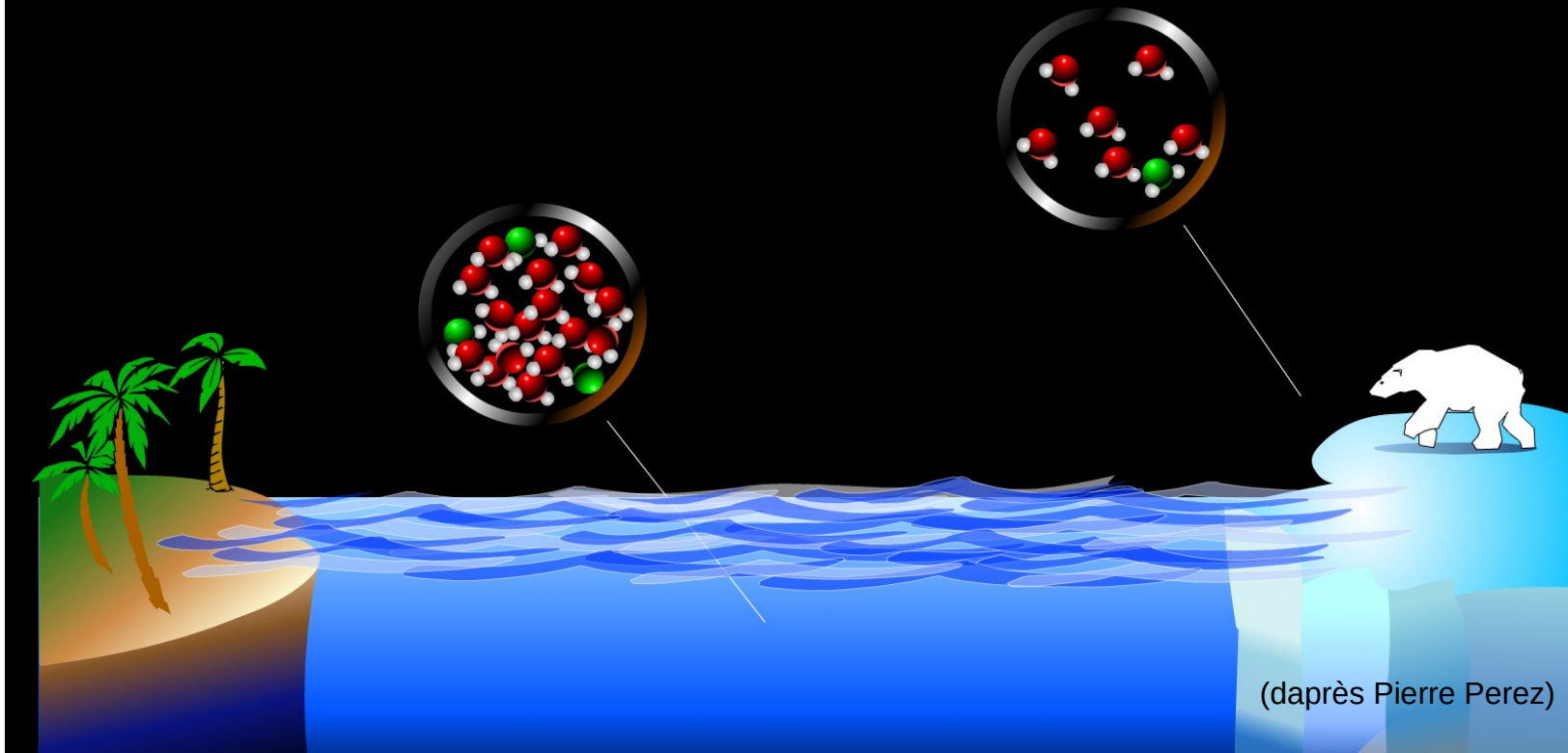


(daprès Pierre Perez)

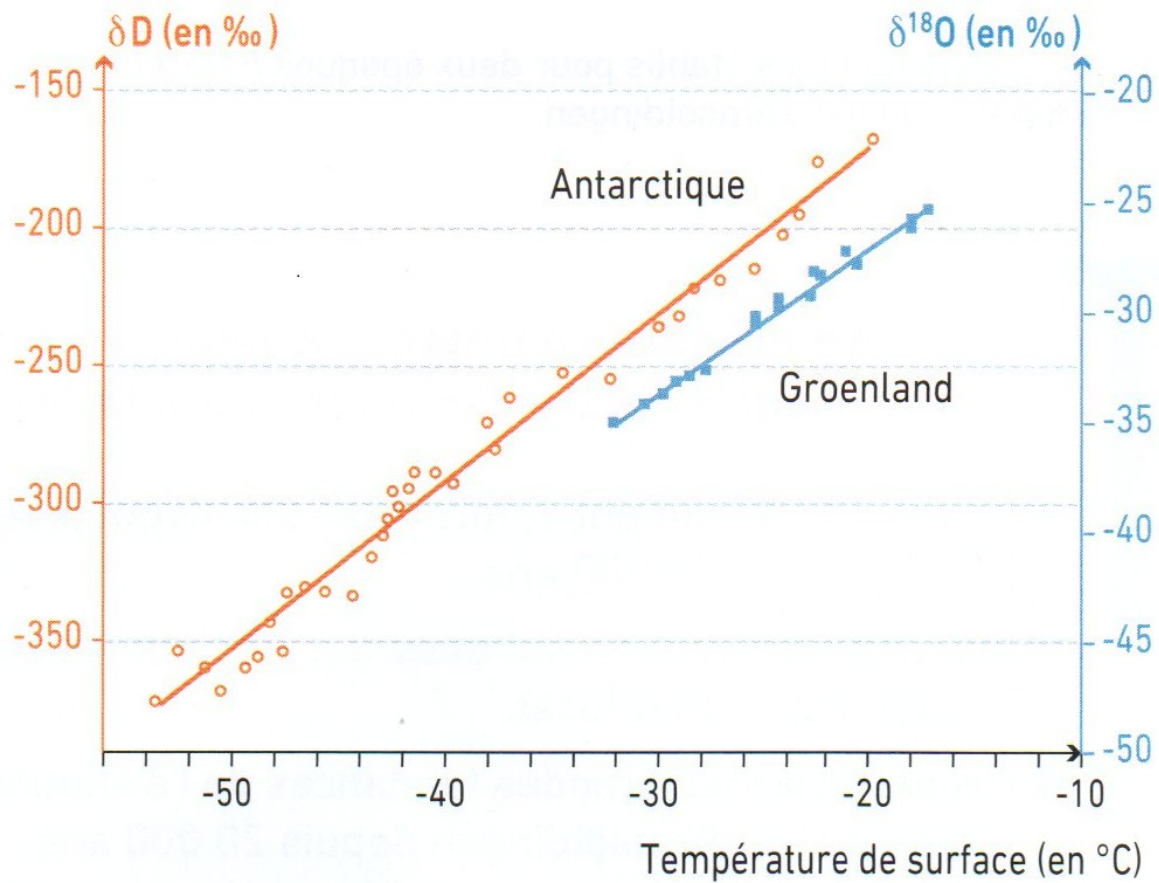
Rapports isotopiques de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) en période glaciaire
(proportions réelles non respectées)



Rapports isotopiques de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) en période de réchauffement climatique
(proportions réelles non respectées)

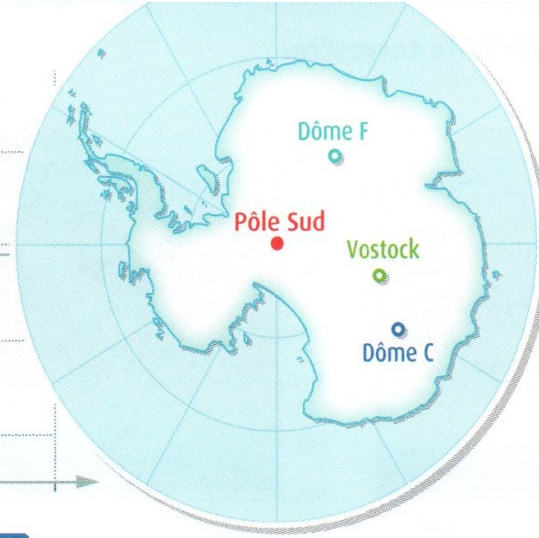
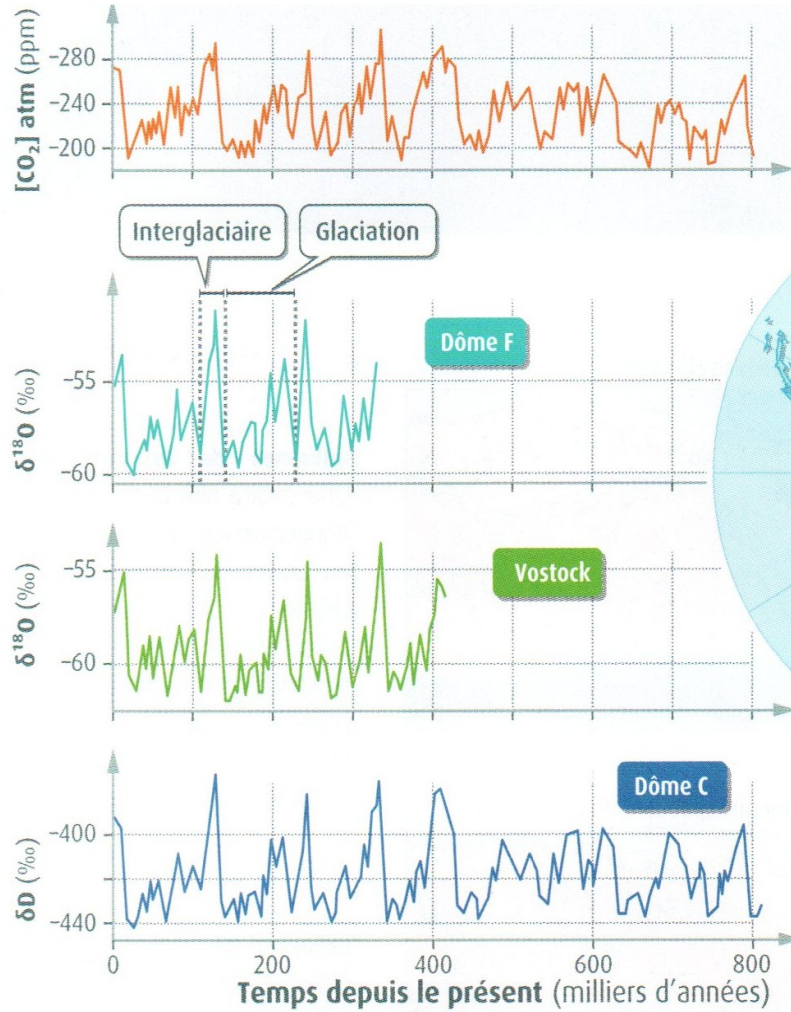


(daprès Pierre Perez)

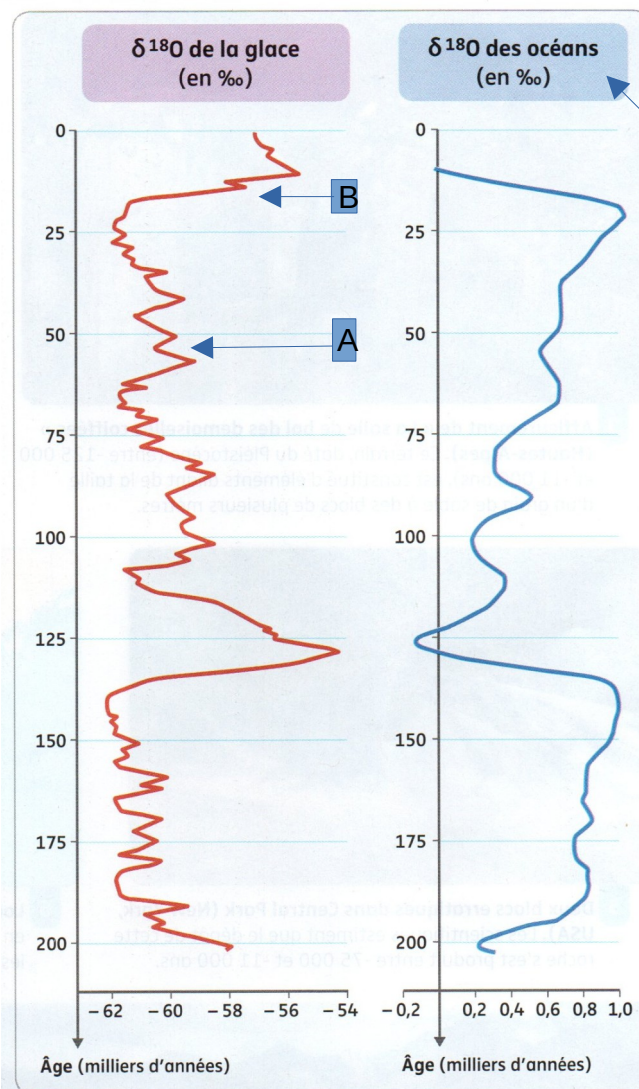


(Dunbar et al. 1997)

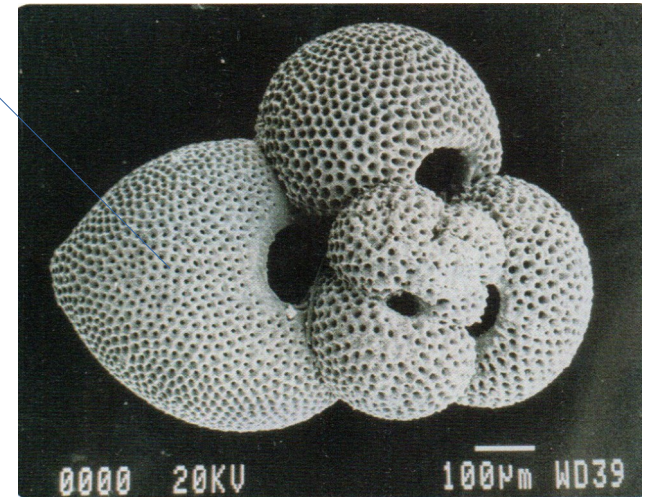
Évolution de $\delta^{18}\text{O}$, δD et de la concentration atmosphérique en CO_2 en fonction du temps obtenue par analyse des glaces antarctiques.



(Belin, Ed. 2020, p.299)

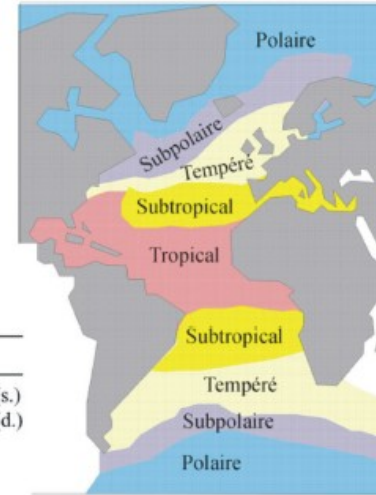


Évolution du $\delta^{18}\text{O}$ dans les glaces antarctiques (Vostok) et dans les sédiments carbonatés océaniques depuis 200 000 ans.



Foraminifère. Le $\delta^{18}\text{O}$ des océans est calculé en utilisant des mesures réalisées sur des coquilles carbonatées de foraminifères (organismes unicellulaires) fossiles.

Distribution biogéographique des foraminifères planctoniques en Atlantique Nord



Assemblage arctique

N. pachyderma senestre



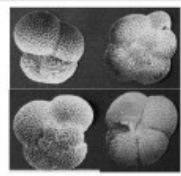
Assemblages bioclimatiques :

Domaine :	Espèces :
Arctique	<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (s.)
Sub-arctique	<i>Neogloboquadrina pachyderma</i> (d.) <i>Globigerina bulloides</i> <i>Globigerina quinqueloba</i>
Sub-tropical	<i>Globigerinoides ruber</i> <i>Globigerina falconensis</i>

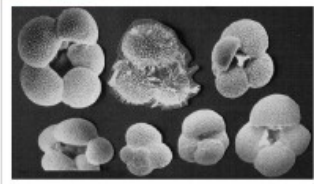
(d'après Bé et Tolerlund, 1971; Imbrie et Kipp, 1971)

Assemblage sub-arctique

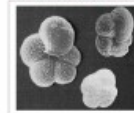
N. pachyderma dextre



G. bulloides

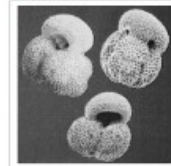


G. quinqueloba

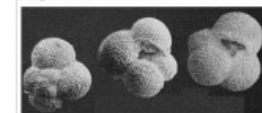


Assemblage sub-tropical

G. ruber

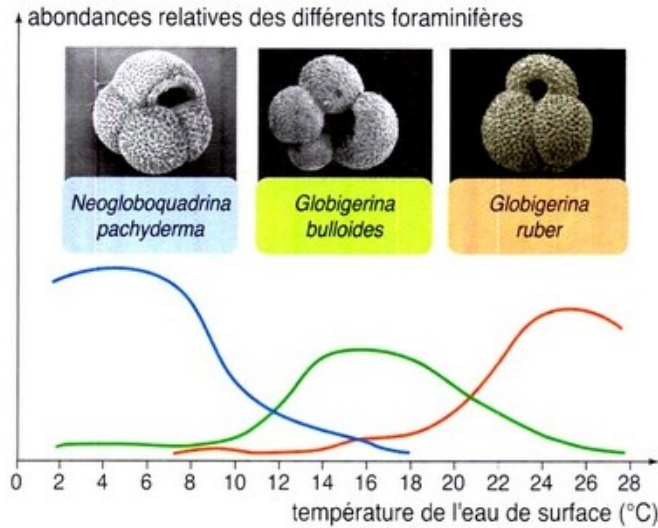


G. falconensis



- **Données pour la période actuelle**

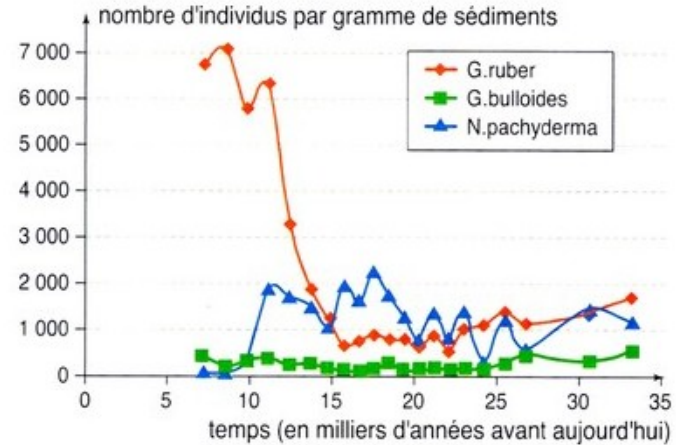
Les échantillons de sédiments marins contenant des foraminifères ont été prélevés par carottage en différents points de l'Atlantique Nord. Dans les sédiments superficiels (donc récents), des comptages ont permis d'estimer l'abondance relative de trois espèces (*graphie ci-dessous*).

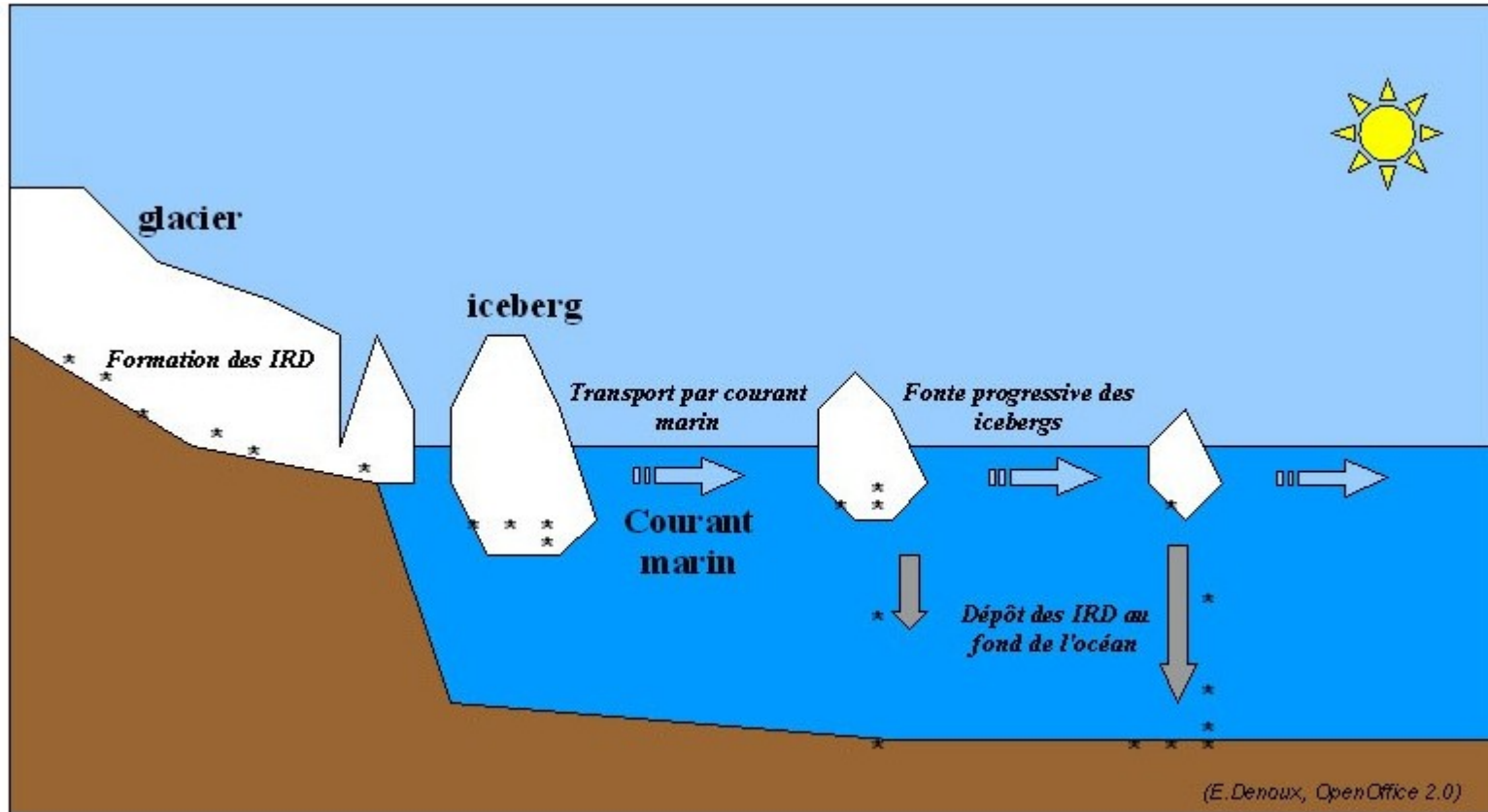


- **Données pour des périodes plus anciennes**

À partir de prélèvements de sédiments plus profonds (plus anciens) effectués dans de nombreux sites océaniques, on peut retracer l'évolution de la température des eaux et en déduire les variations climatiques globales.

Par exemple, le *document ci-dessous* a été obtenu à partir d'échantillons provenant de différents niveaux d'un carottage réalisé par 0° de latitude et 23° de longitude ouest.

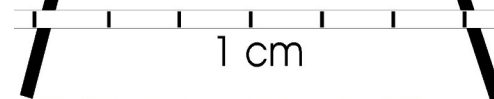
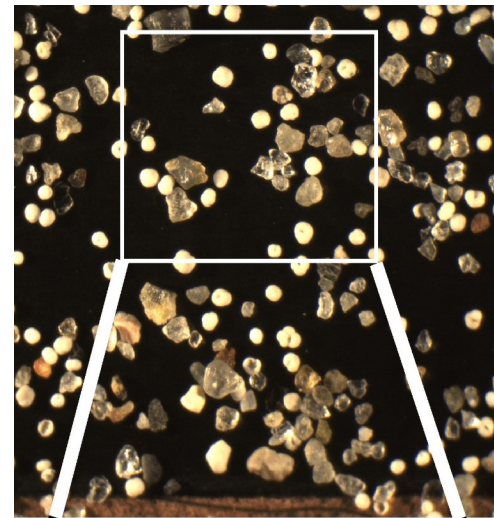




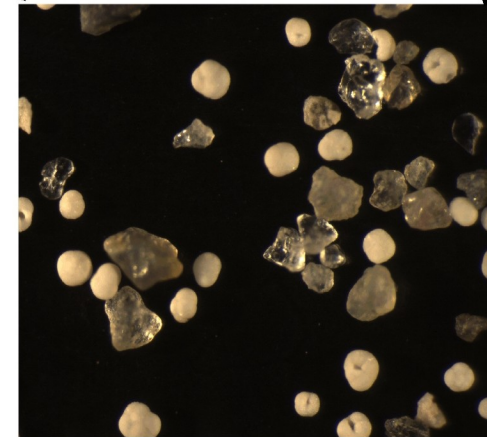
IRD : Ice-Rafted Detritus = débris provenant de fragments de roches arrachés par les glaciers, puis transportés en pleine mer par les icebergs détachés de ces glaciers. Lors de leur fonte, ces icebergs relâchent ces fragments de roches sur le fond marin



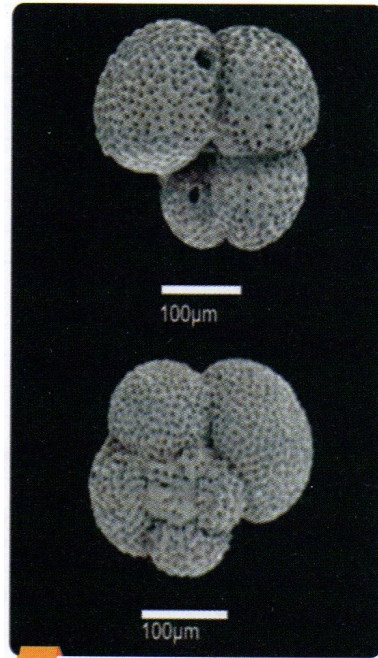
Échantillon 1



Échantillon 2

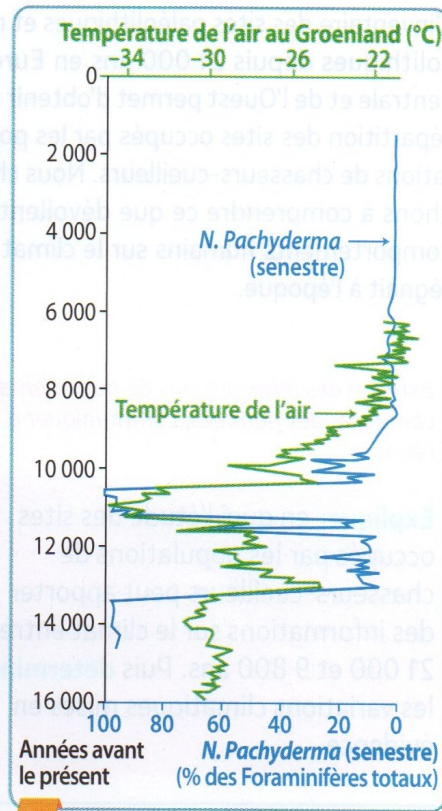


Zoom (X2.5)



1 Coquille dextre de *Neogloboquadrina pachyderma* observée au microscope électronique à balayage

(Hachette, Ed. 2020, p.225)

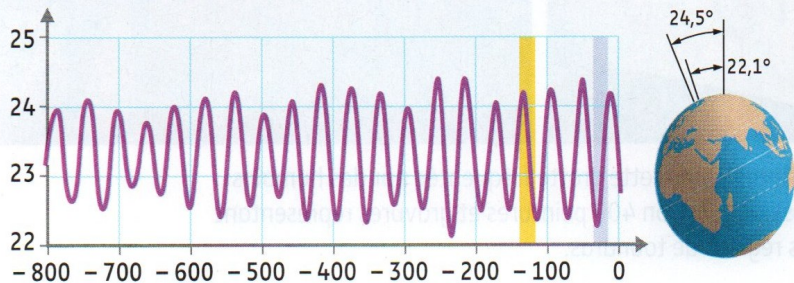


2 Température de l'air au Groenland et sens d'enroulement des coquilles de *Neogloboquadrina pachyderma* dans l'Atlantique Nord au cours du temps

Température d'après les mesures isotopiques

Source : whai.edu

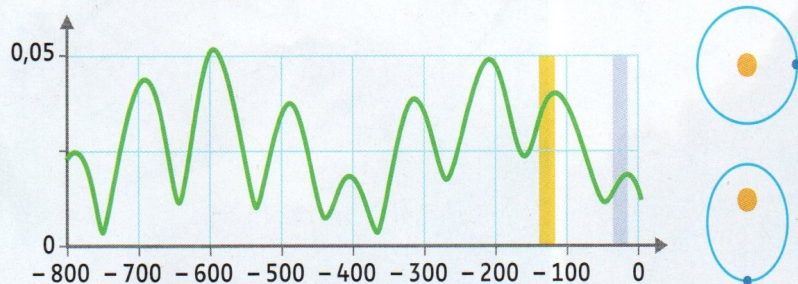
Obliquité



Changement d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre

Lorsque sa valeur est faible, le contraste entre l'été et l'hiver est peu marqué. C'est l'inverse lorsque sa valeur est élevée.

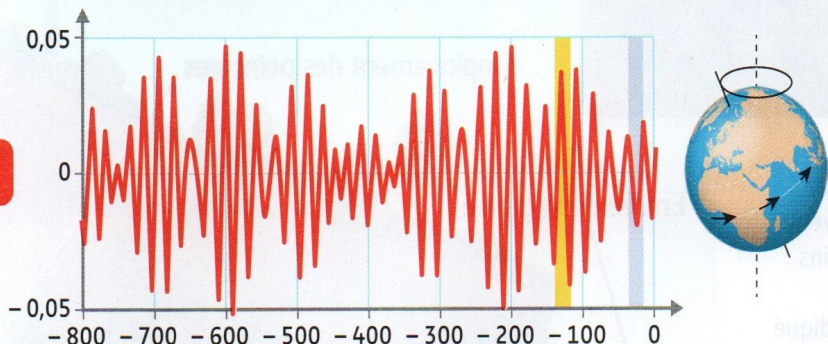
Excentricité



Changement de la forme de l'orbite de la Terre autour du Soleil.

Lorsque sa valeur est faible, l'orbite est quasi-circulaire, entraînant un faible contraste entre l'été et l'hiver. C'est l'inverse lorsque sa valeur est élevée.

Précession



Changement de direction de l'axe de rotation de la Terre, l'axe tourne comme une toupie.

Lorsque sa valeur est faible, c'est l'été dans l'hémisphère nord quand la Terre est dans sa position la plus éloignée du Soleil, entraînant un faible contraste entre l'été et l'hiver dans l'hémisphère nord. C'est l'inverse lorsque sa valeur est élevée.

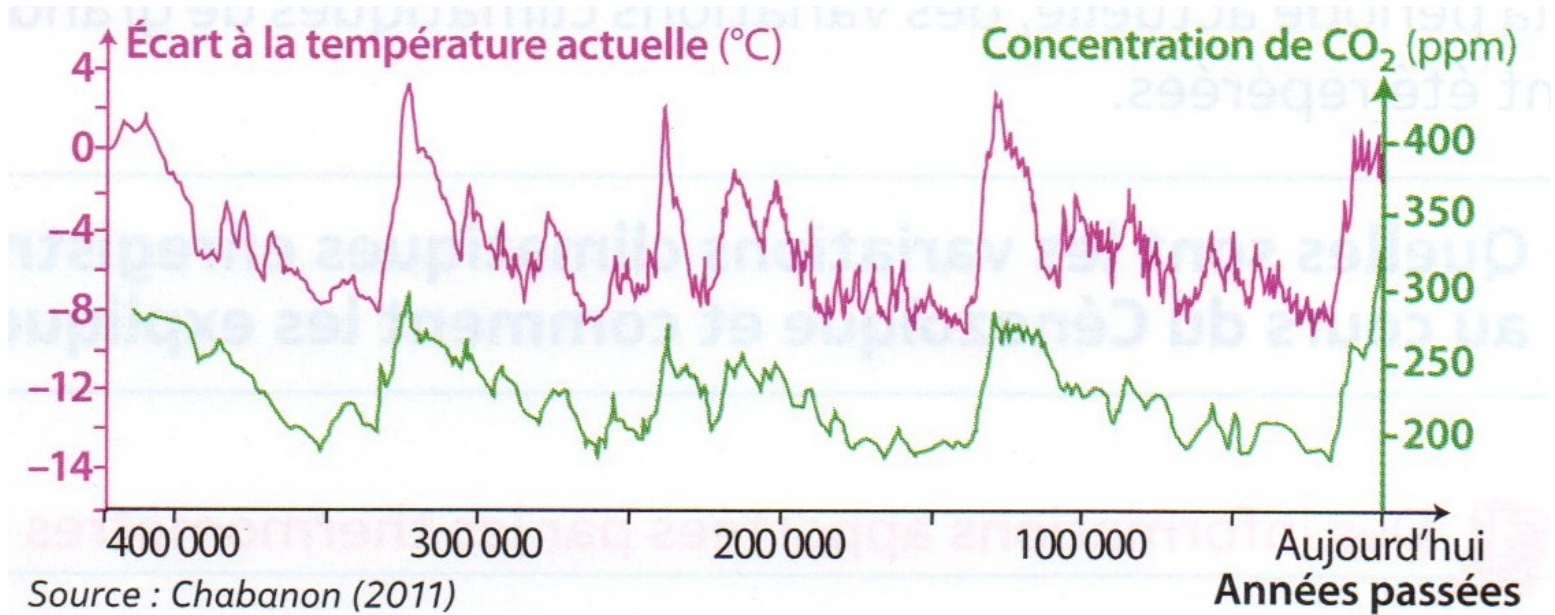
La quantité d'énergie solaire reçue par la Terre conditionne son climat global. Entre 1920 et 1941, Milutin Milankovitch (mathématicien yougoslave) a étudié les paramètres de l'orbite terrestre et postulé un lien avec les variations climatiques sur Terre (succession des cycles glaciaires-interglaciaires). Pour cela, il s'appuie sur une étude des hautes latitudes de l'hémisphère Nord, plus continentales donc susceptibles de porter des glaciers.



Portrait de Milutin Milankovitch (1879-1958) en 1943

(d'après Hachette, Ed.2020, p.210)

(d'après Nathan, Ed.2020, p.246)



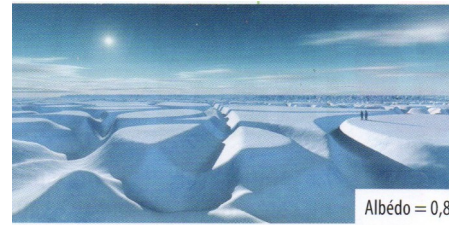
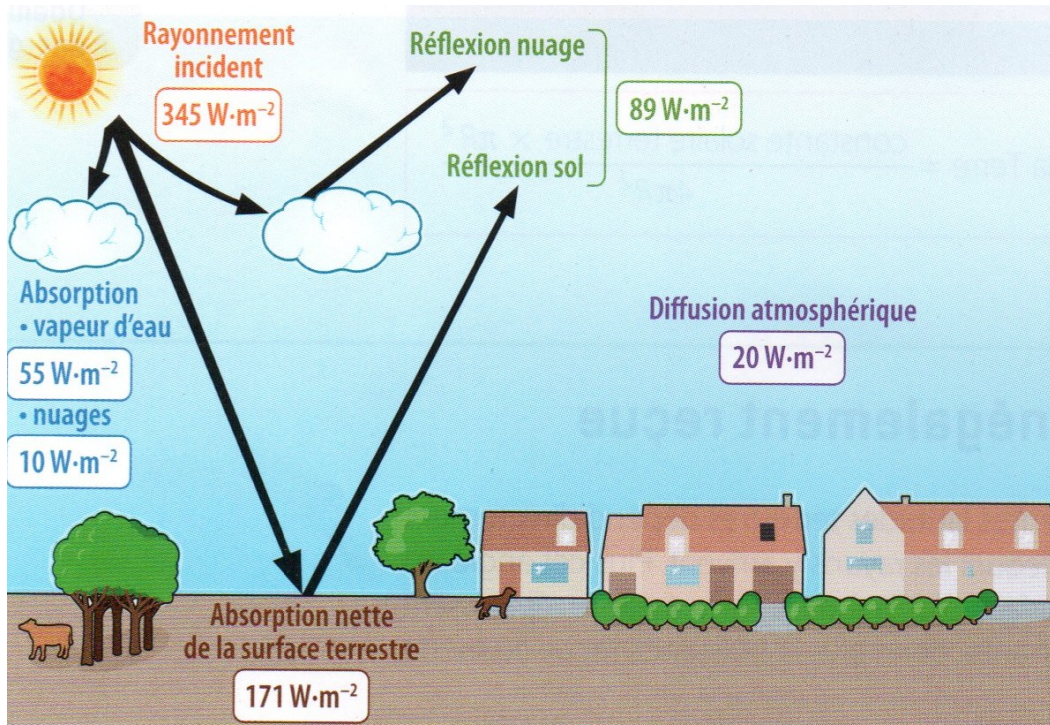
Source : Chabanon (2011)

Teneur en CO₂ de l'atmosphère (dédiuite des analyses de l'air contenu dans les bulles de glace de l'Antarctique) et température atmosphérique (dédiuite de l'étude du $\delta^{18}\text{O}$) au cours des derniers milliers d'années

(hachette, Ed.2020, p.211)

Évolution de la solubilité du CO₂ en fonction de la température.

Température (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Solubilité (g.L ⁻¹)	3,35	2,32	1,68	1,26	0,97	0,76	0,57	0,43	0,25	0,08	0

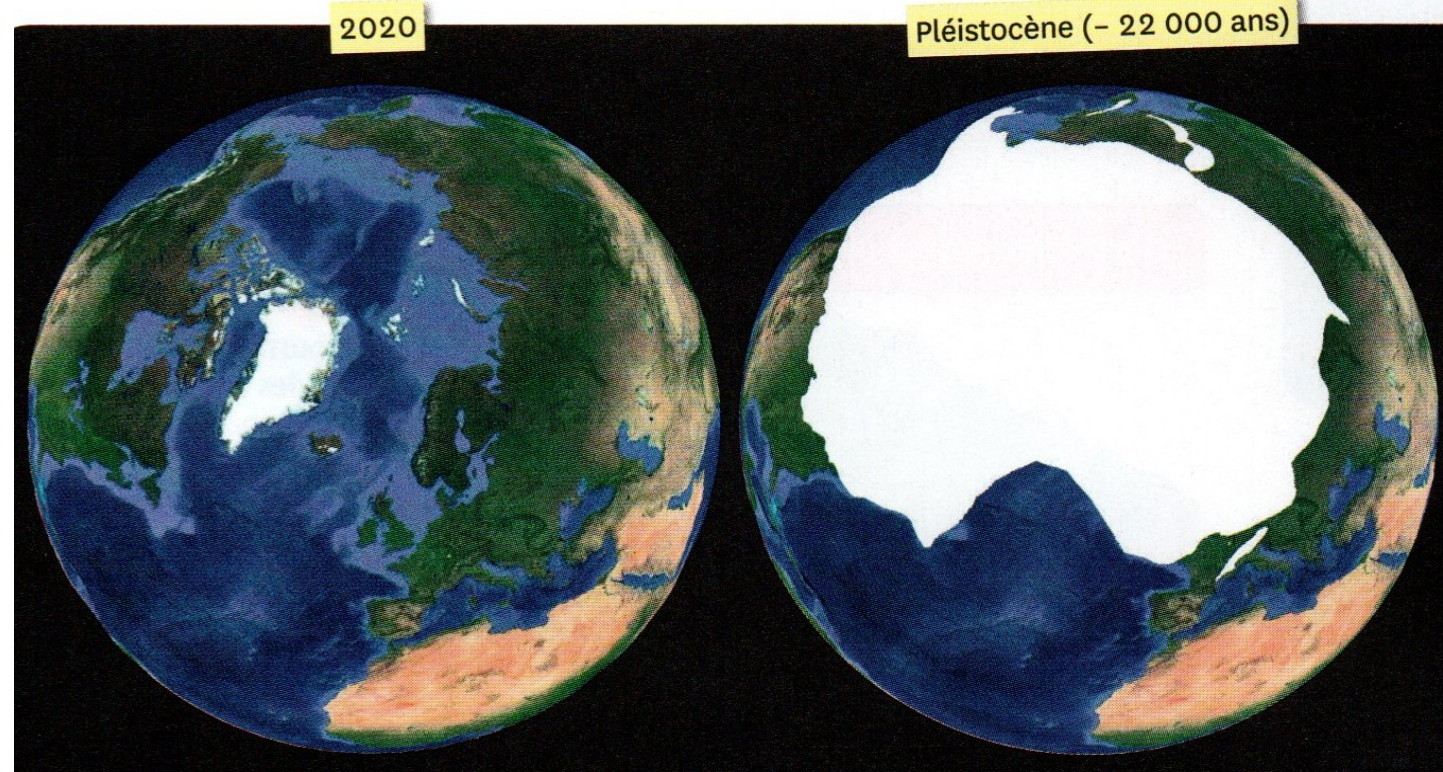
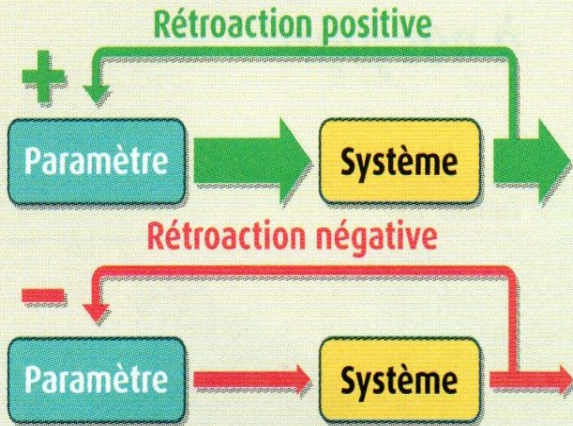


(d'après Didier, Ed.2019 pp 80-81)

$$\text{Albédo} = \frac{\text{Rayonnement réfléchi}}{\text{Rayonnement incident}}$$

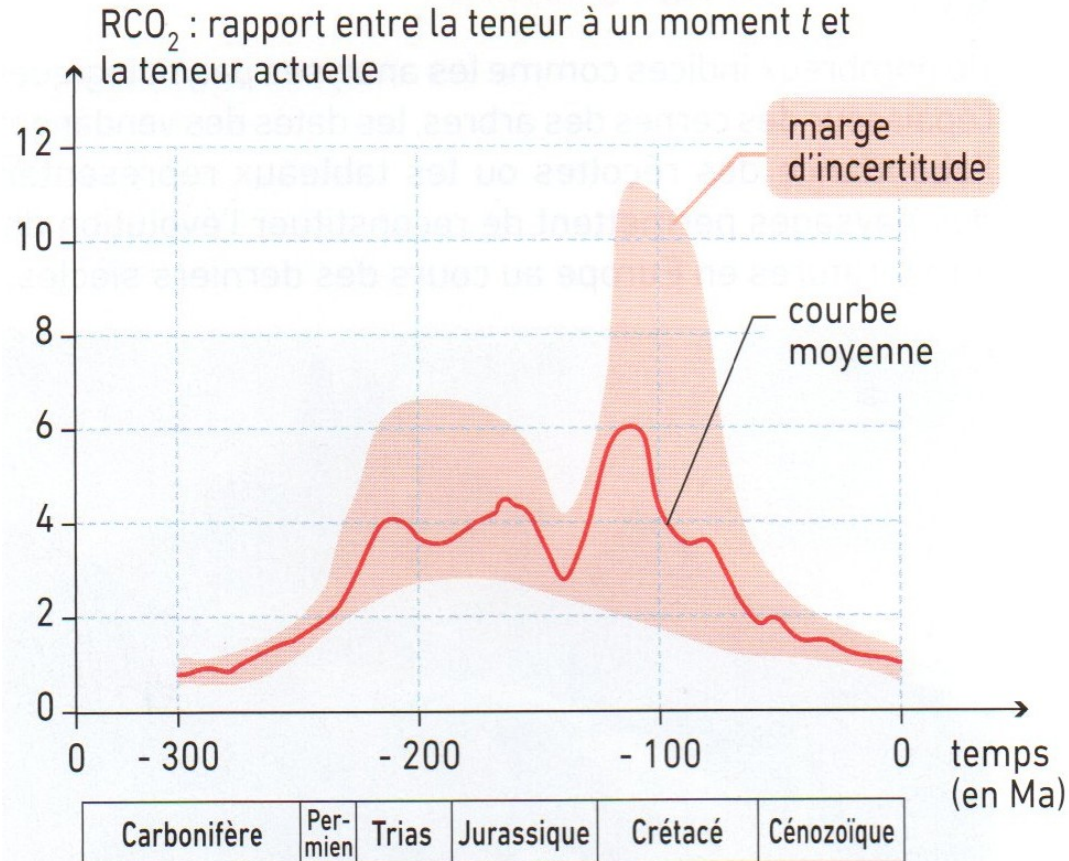
Milieu	% surface Terre
Océans	70
Déserts	9
Calottes glaciaires	10
Montagnes	3
Végétation	8

Rétroaction : Action en retour d'un système à la modification d'un paramètre. Si la réponse du système amplifie le phénomène, on parlera de rétroaction positive. Si elle l'atténue, on parlera de rétroaction négative.



Étendue de la banquise et de la calotte glaciaire au niveau du Groenland.

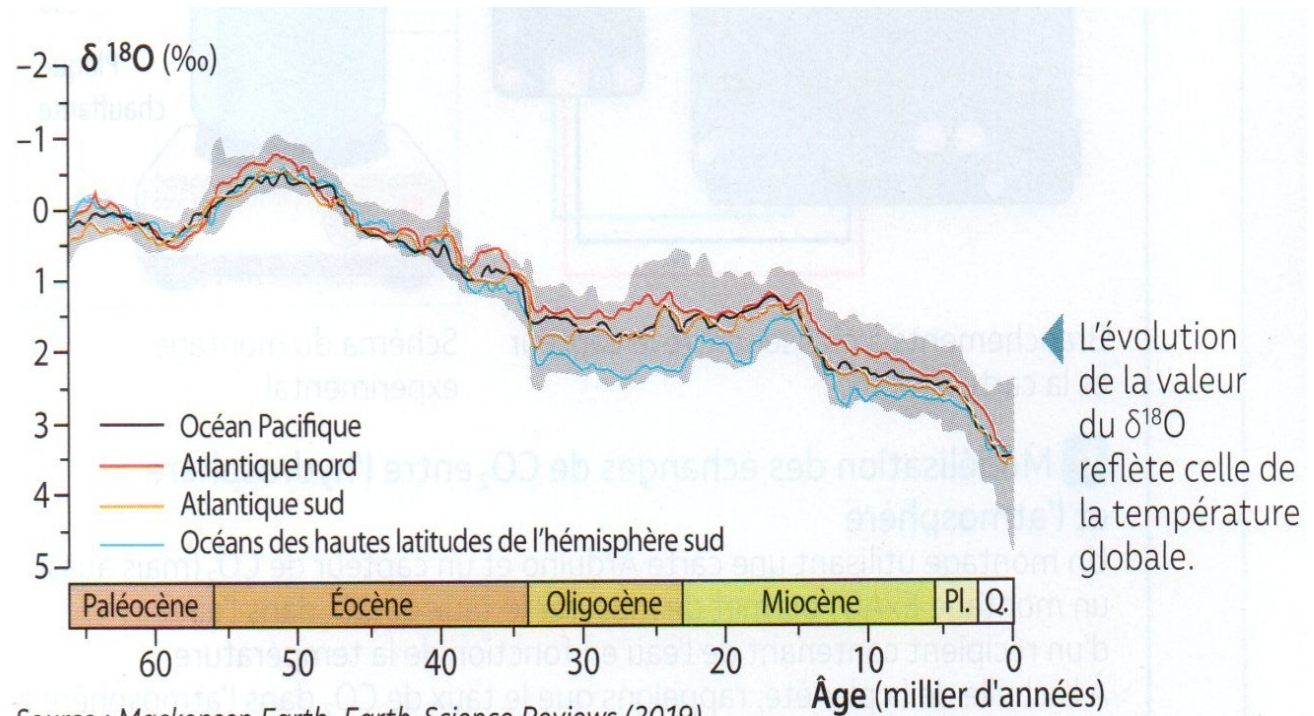
Les variations climatiques à l'échelle des temps géologiques



Modélisation de la teneur atmosphérique en CO_2 depuis 300 Ma

Des périodes de refroidissement :

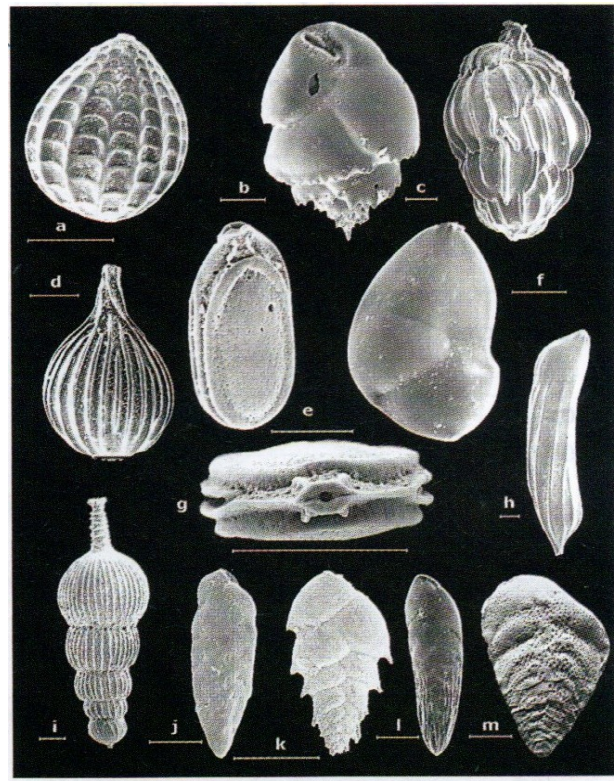
Au Cénozoïque (tertiaire) entre -66 et -2,6 Ma



Source : Mackensen Earth, Earth-Science Reviews (2019)

Évolution au cours du Cénozoïque du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques (= vivant sur le fond) récoltés dans différents océans

(Hachette, Ed.2020, p.212)



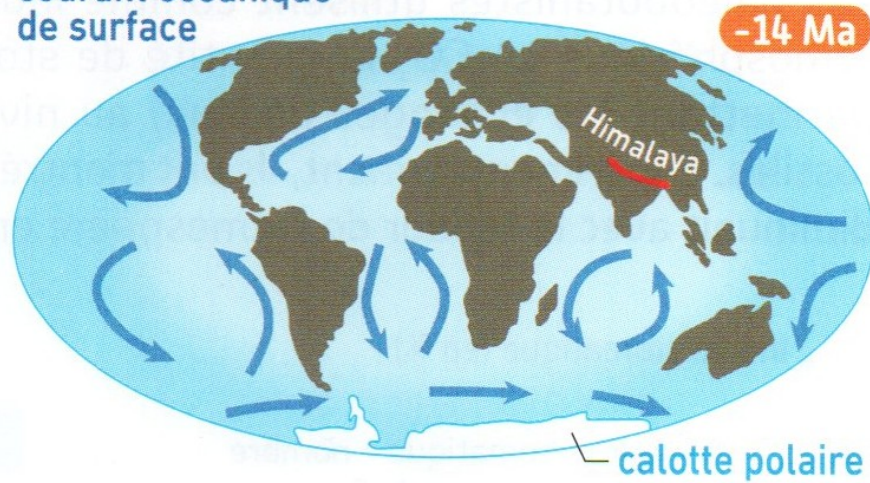
Tests de foraminifères benthiques de la marge atlantique du Maroc observés au microscope électronique à balayage

- (a) Oolina (b) Bulimina (c) Uvigerina
- (d) Lagenina (e) Fissurina (f) Lenticulina
- (j-m) Bolivina.

Échelles graphiques : 100 μm

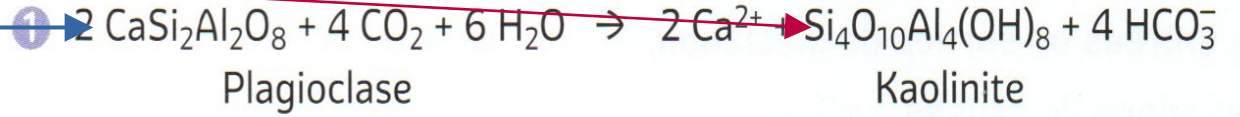


→
courant océanique
de surface



**Dynamique des masses continentales
et courants marins.**

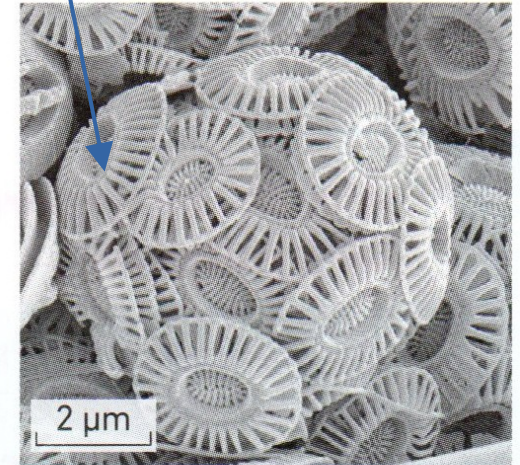
(Bordas, Ed. 2020, p.303)



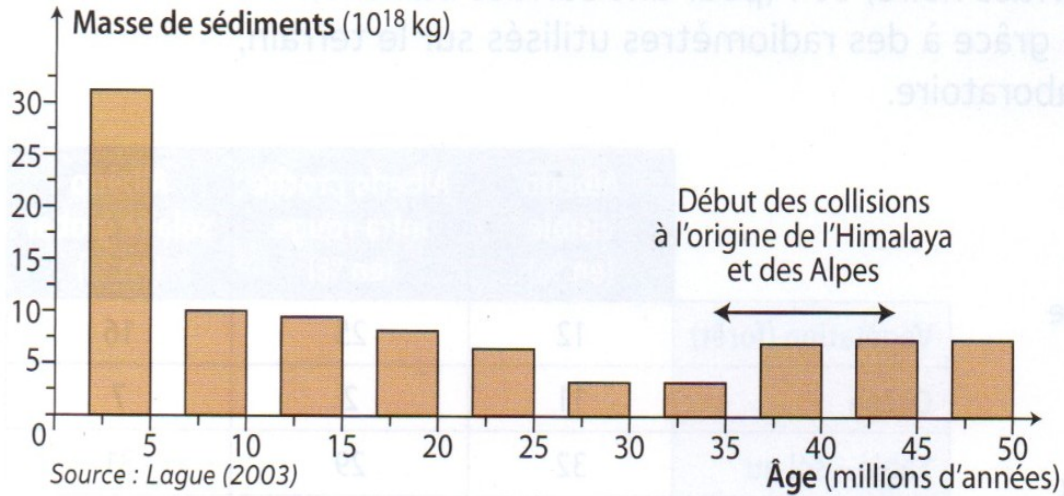
A Observation d'un granite altéré au microscope en lumière polarisée analysée.



B Échantillon d'un granite altéré.



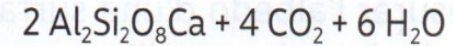
C Tests calcaires de coccolithophoridés (microalgues), observés au MEB*.



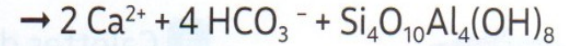
Histogramme des masses de sédiments déposés au cours du temps dans les bassins sédimentaires

Dès le début de sa formation, une chaîne de montagne est soumise à l'érosion. Grâce à des études géologiques menées dans ces bassins, il est possible d'estimer le taux d'accumulation des sédiments au cours du temps.

Source : d'après Peizhen et al., 2001

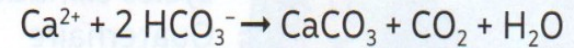


Plagioclase calcique



ions calcium en solution ions bicarbonate en solution kaolinite

Les ions transportés vers des zones de sédimentation précipitent pour former du calcaire selon la réaction suivante :



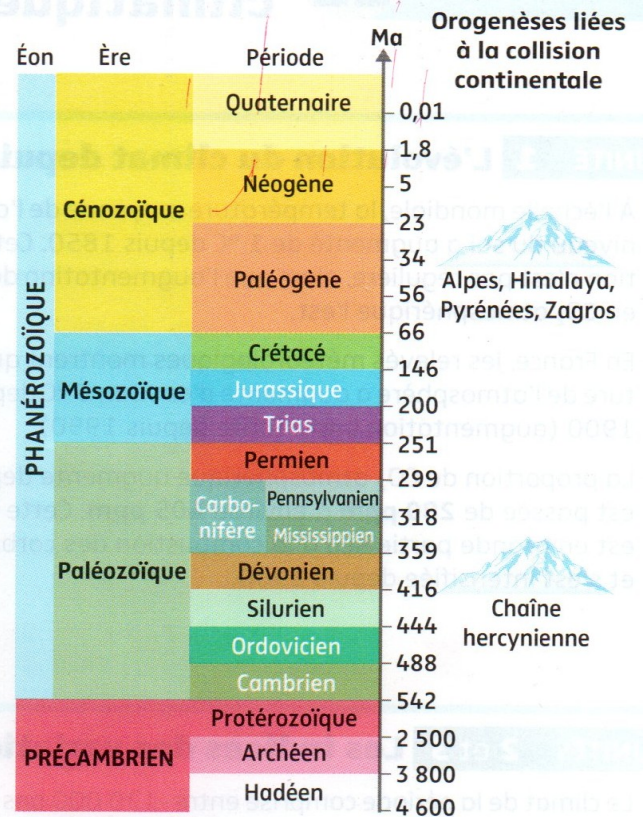
L'altération de deux plagioclases permet ainsi de piéger durablement 2 CO_2 .

Réaction d'altération d'un plagioclase calcique, minéral fréquent dans la croûte continentale

(Hachette, Ed.2020, p.213)

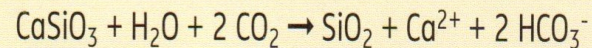


A Périodes et conséquences de la formation des principales chaînes de montagnes.



L'eau est le principal agent d'altération des roches. En ruisselant et en s'infiltrant dans les roches, des réactions se produisent (hydrolyse, dissolution...).

Exemple de l'hydrolyse d'un pyroxène calcique :



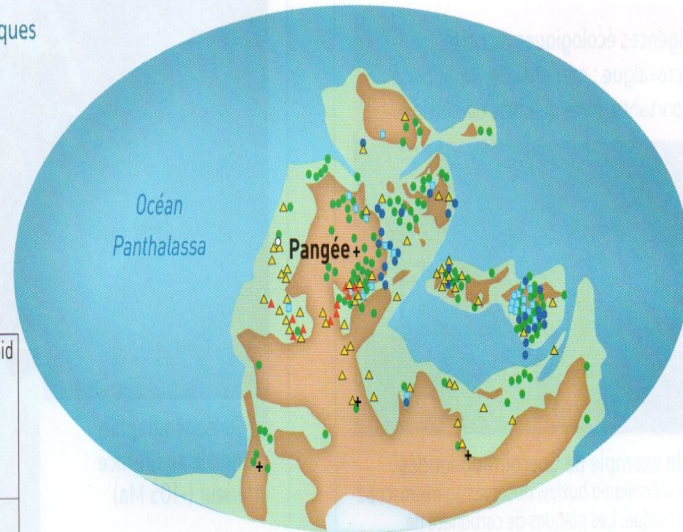
B Réactions chimiques d'hydrolyse des minéraux silicatés.

Au Paléozoïque (primaire) entre -541 et -252,2 Ma

Localisation d'indices lithologiques
et paléontologiques au cours de
deux périodes du Paléozoïque

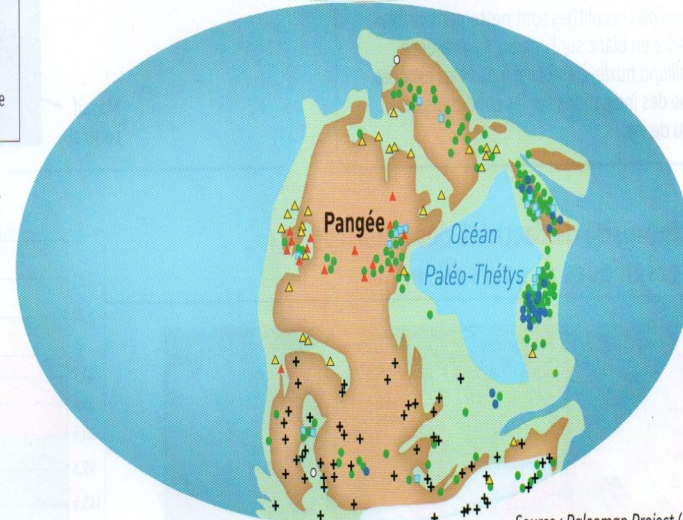
**Carbonifère inférieur
(-350 Ma)**

	CHAUD	FROID
HUMIDE	Tropical ● Charbon ● Bauxite	Tempéré froid ● Charbon
SEC	Kaolinite (argile)	
	Aride ▲ Évaporites ▲ Encroûtements calcaires	Froid + Tillites ○ Dropstone

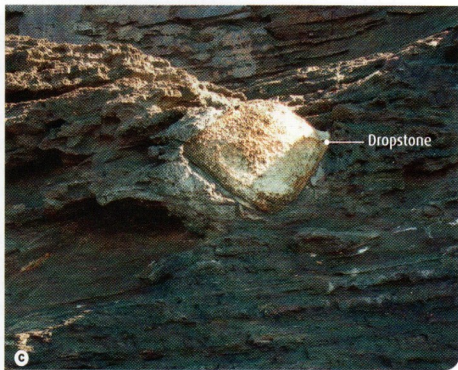
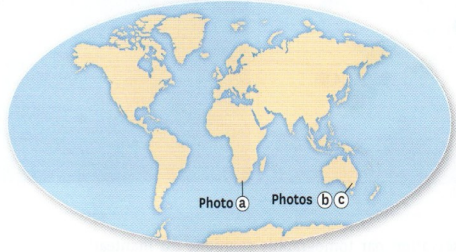


**Permien inférieur
(-265 Ma)**

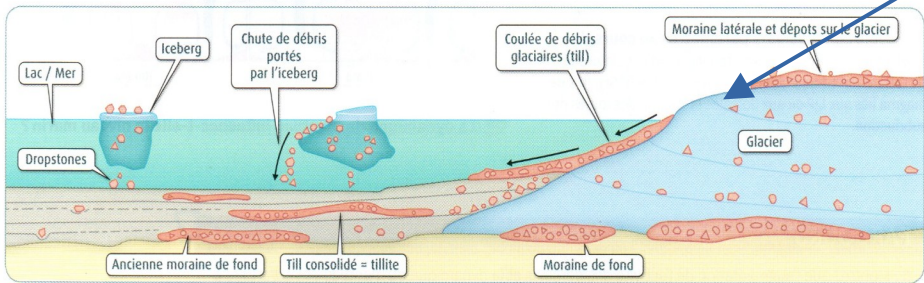
□	Calotte glaciaire
■	Marges continentales
■	Continents



Source : Paleomap Project (2004)

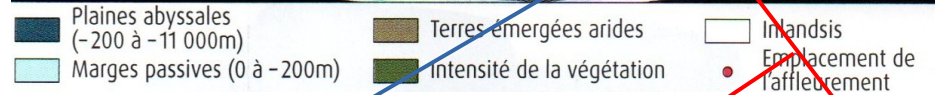
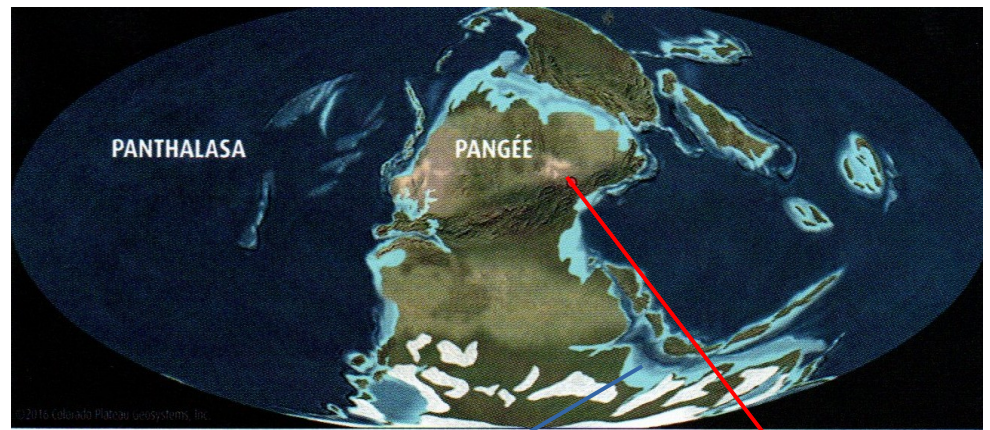


1 Stries glaciaires (a ; 302 à 298 Ma, Afrique du Sud), tillite (b) et dropstone (c ; 287 à 270 Ma, Australie).

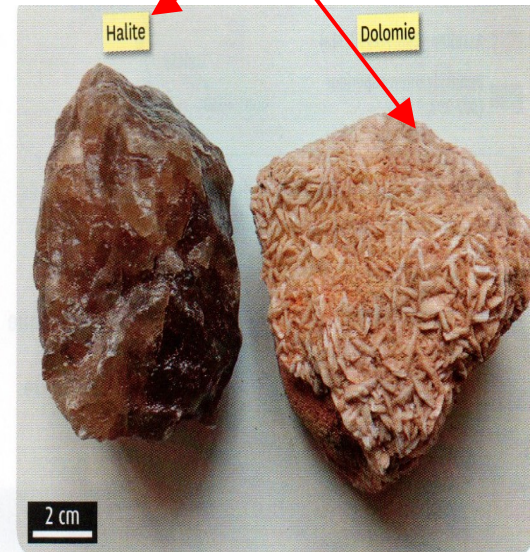


2 L'origine des tillites et des dropstones.

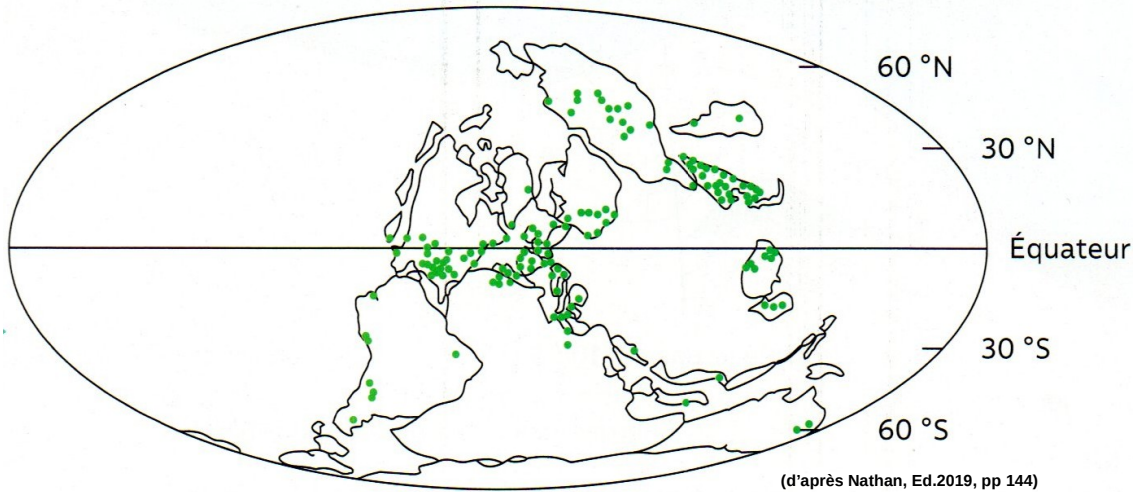
(Belin, Ed. 2020, p.326-327)



Formation rubéfiée du bassin de Saint-Dié (Vosges).



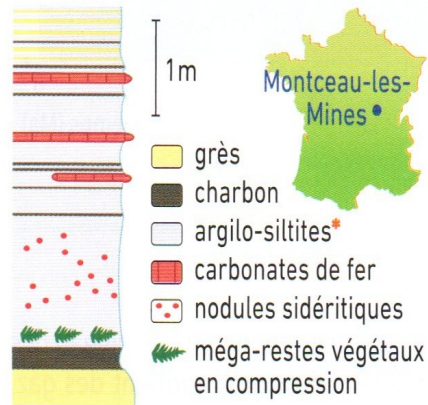
Échantillons d'halite et de dolomie datant du Permien.



Situation géographique de la forêt houillère au carbonifère

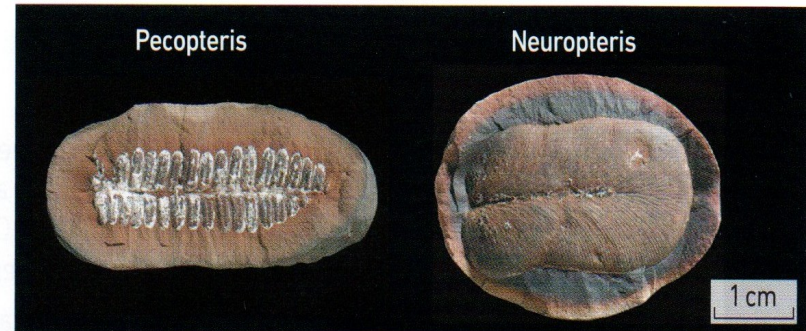


C Reconstitution de la forêt houillère.



A Séquence stratigraphique du gisement fossilifère de Montceau-les-Mines.

Remarque : la sidérite ou carbonate de fer se forme en milieu lacustre* et témoigne d'un climat tropical.



B Végétaux dans les nodules sidéritiques.

(Bordas, Ed. 2020, p.306)

Des périodes de réchauffement :

Au Mésozoïque (secondaire) entre -252,2 et -66 Ma :

Découverte de fossiles de végétaux et d'animaux datant du Mésozoïque en France

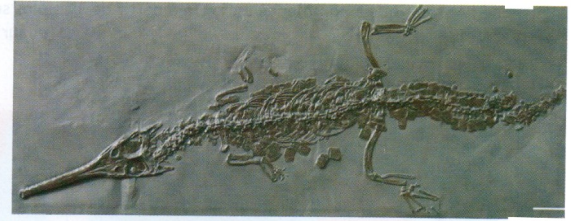
a Des fougères arborescentes dans l'Ain

Fronde de *Cycadopteris jurensis*, Ptéridospermale du Kimméridgien (150 Ma), Cerin (Ain). Les Ptéridospermales n'existent plus, mais les fossiles montrent que la majorité de ces végétaux devaient ressembler aux fougères arborescentes.



Fougère arborescente actuelle, île de Fayal, Açores (située dans l'Atlantique au large du Portugal).

b Des fossiles de crocodiles en Bourgogne



Moulage de fossile de crocodile de 2,5 mètres de long. Ce crocodile appartient à un groupe ayant vécu entre le Jurassique inférieur et le Crétacé inférieur (-200 à -100 Ma).



c Des fossiles de corail dans le Boulonnais

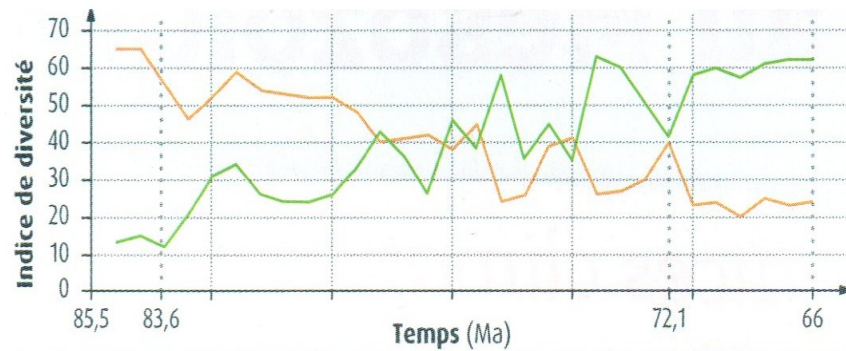


Deux types de coraux fossiles datant du Jurassique (-201,3 à 145 Ma). Les organismes sont associés en colonies et fabriquent un squelette calcaire conservé au cours du temps.

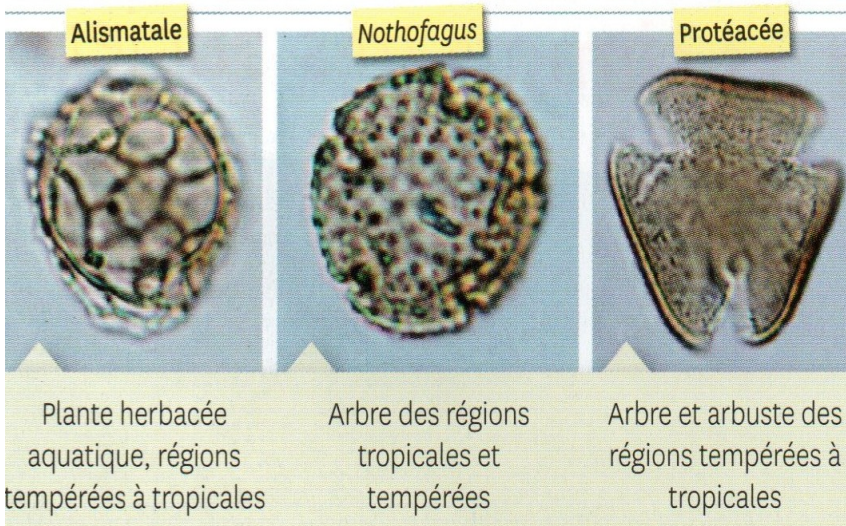
d Coraux actuels dans leur milieu naturel



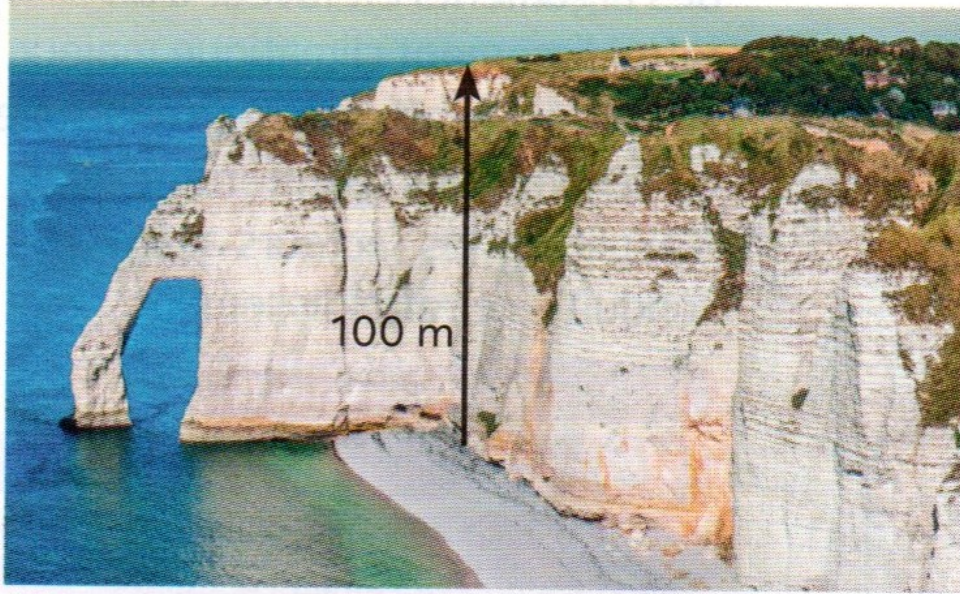
Les coraux actuels sont des organismes qui vivent dans les mers chaudes et peu profondes. L'image montre une grande diversité d'espèces de coraux fixés auprès desquels vivent de nombreuses espèces de poissons qui y trouvent refuge et nourriture. On trouve par exemple des barrières de corail au large des côtes australiennes, de la Nouvelle-Calédonie ou encore de l'île de La Réunion.



— Diversité des plantes sans graines (fougères, mousses) — Diversité des angiospermes



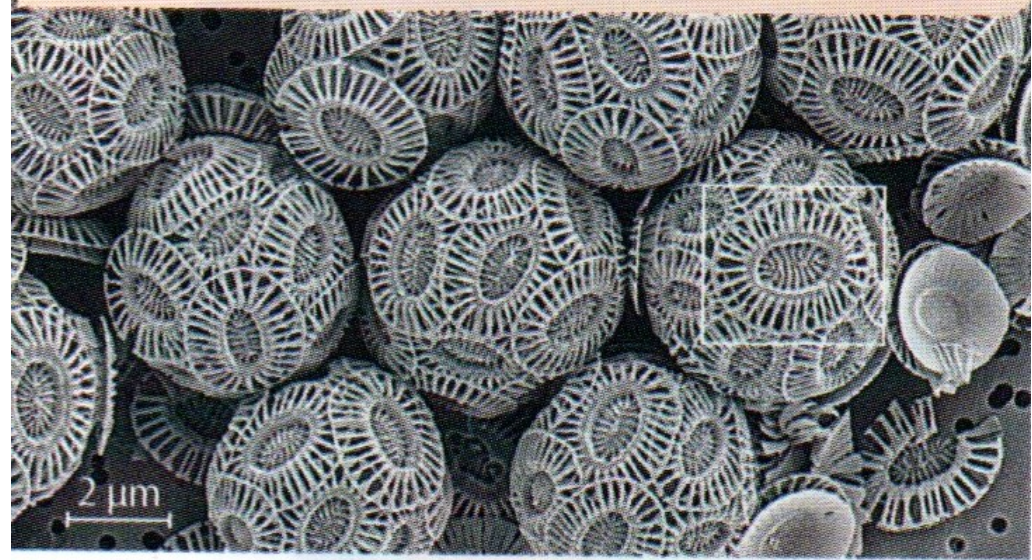
Diversité des pollens dans les roches carottées sous la glace antarctique. I



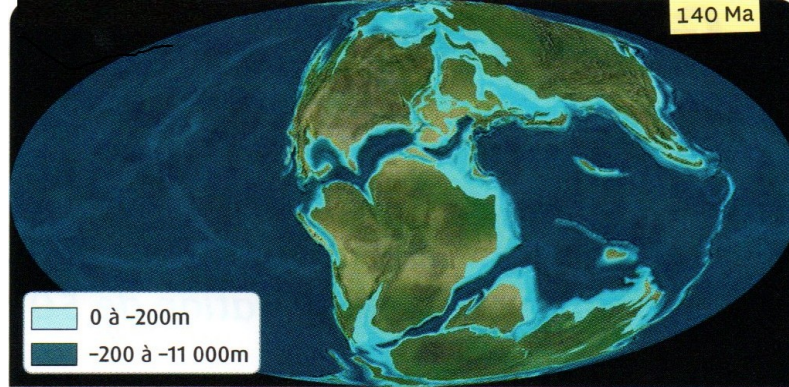
a Les falaises calcaires d'Étretat
(Normandie, France)

La craie est constituée de tests de micro-algues.
On estime que le taux de sédimentation pouvait
attendre 15 cm/1 000 ans.

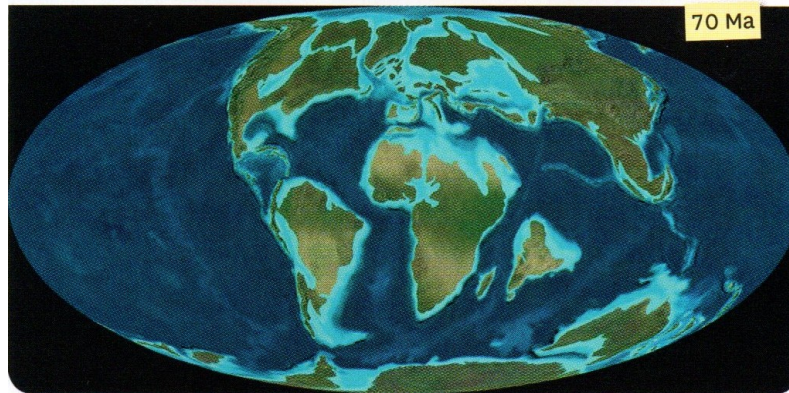
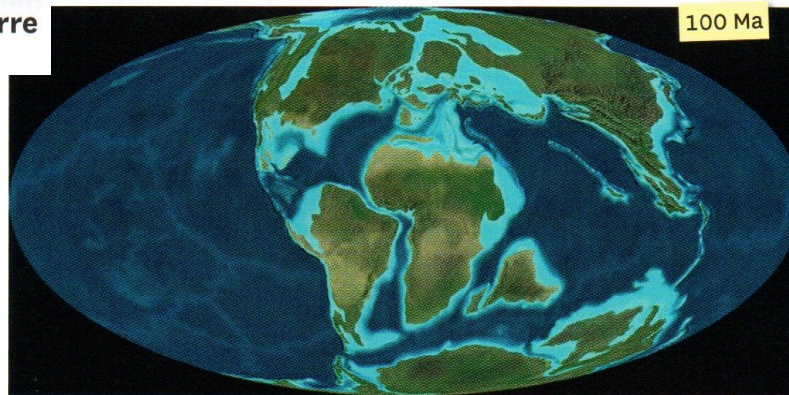
Exigences écologiques de cette
micro-algue : mer chaude, luminosité
importante, forte quantité de nutriments.

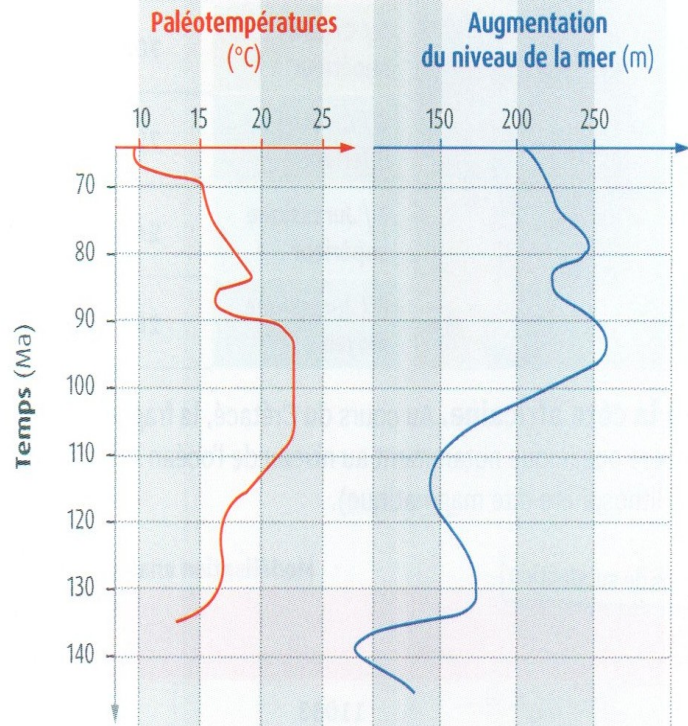


b Un exemple de Coccolithophoridés



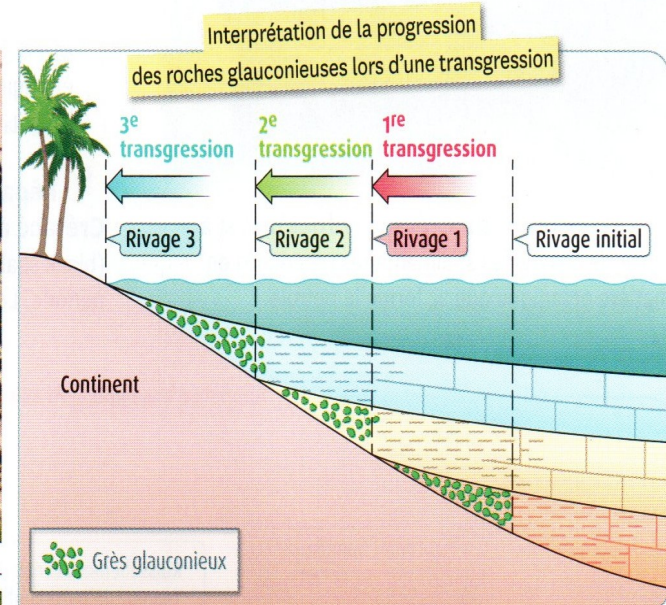
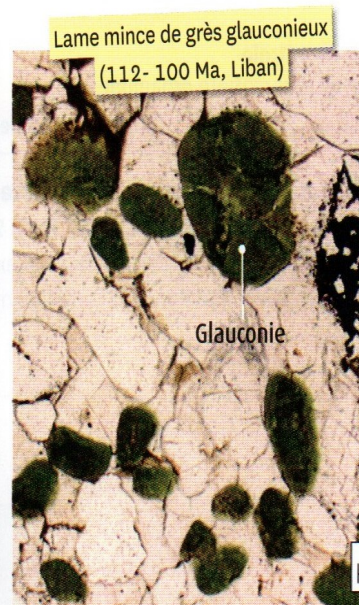
Reconstitution paléogéographique de la Terre au Crétacé.





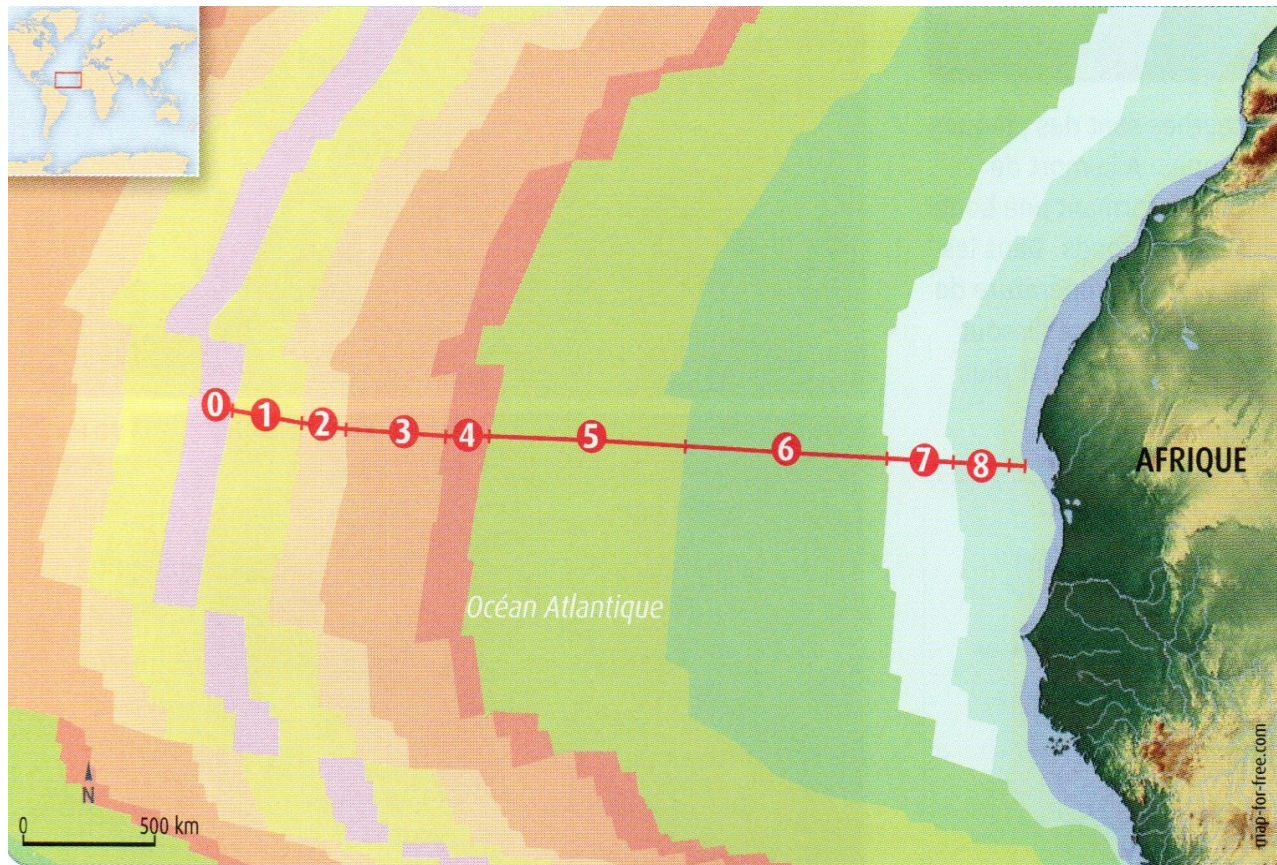
Reconstitution des paléotempératures globales et des variations du niveau marin au Crétacé.

(Belin, Ed. 2020, p.323)



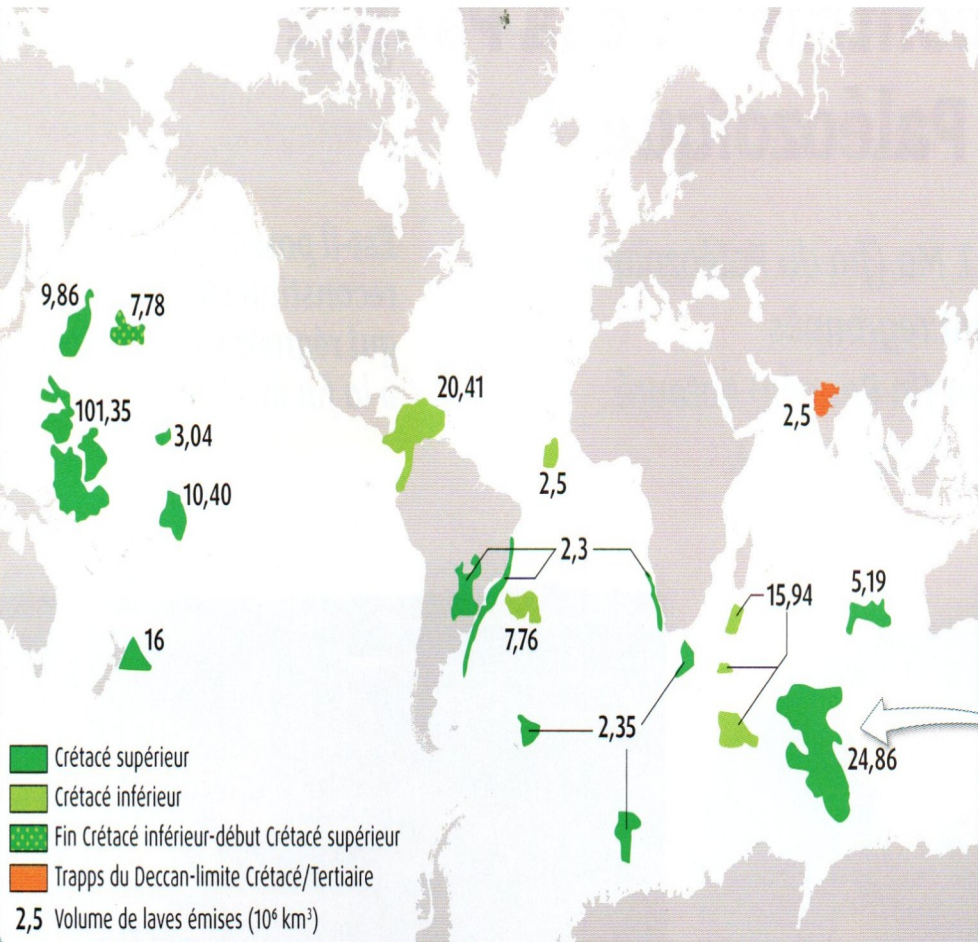
Les roches glauconieuses. Ces roches sont riches en glauconie, un minéral argileux vert. Elles se forment en milieu marin peu profond sous climat chaud, peu oxygéné et dans une eau riche en fer. Le déplacement progressif vers le continent de ces dépôts de roches vertes est le signe de la remontée de la mer (transgression).

(Belin, Ed. 2020, p.322)



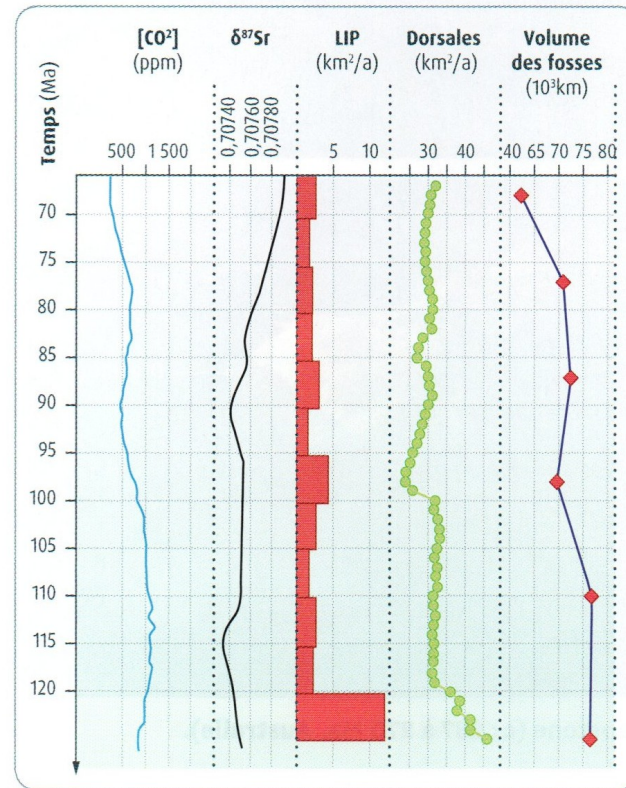
Segment / Série stratigraphique	Longueur de lithosphère produite (km)	Durée (Ma)
0 / Pliocène Quaternaire	64	5,3
1 / Miocène	239	17,7
2 / Oligocène	152	10,9
3 / Eocène	358	22,1
4 / Paléocène	142	10
5 / Crétacé supérieur	708	34,5
6 / Crétacé inférieur	721	44,5
7 / Jurassique supérieur	248	18,5
8 / Jurassique moyen	263	10,6

Âge des fonds océaniques de l'Atlantique central de la dorsale à la côte africaine.



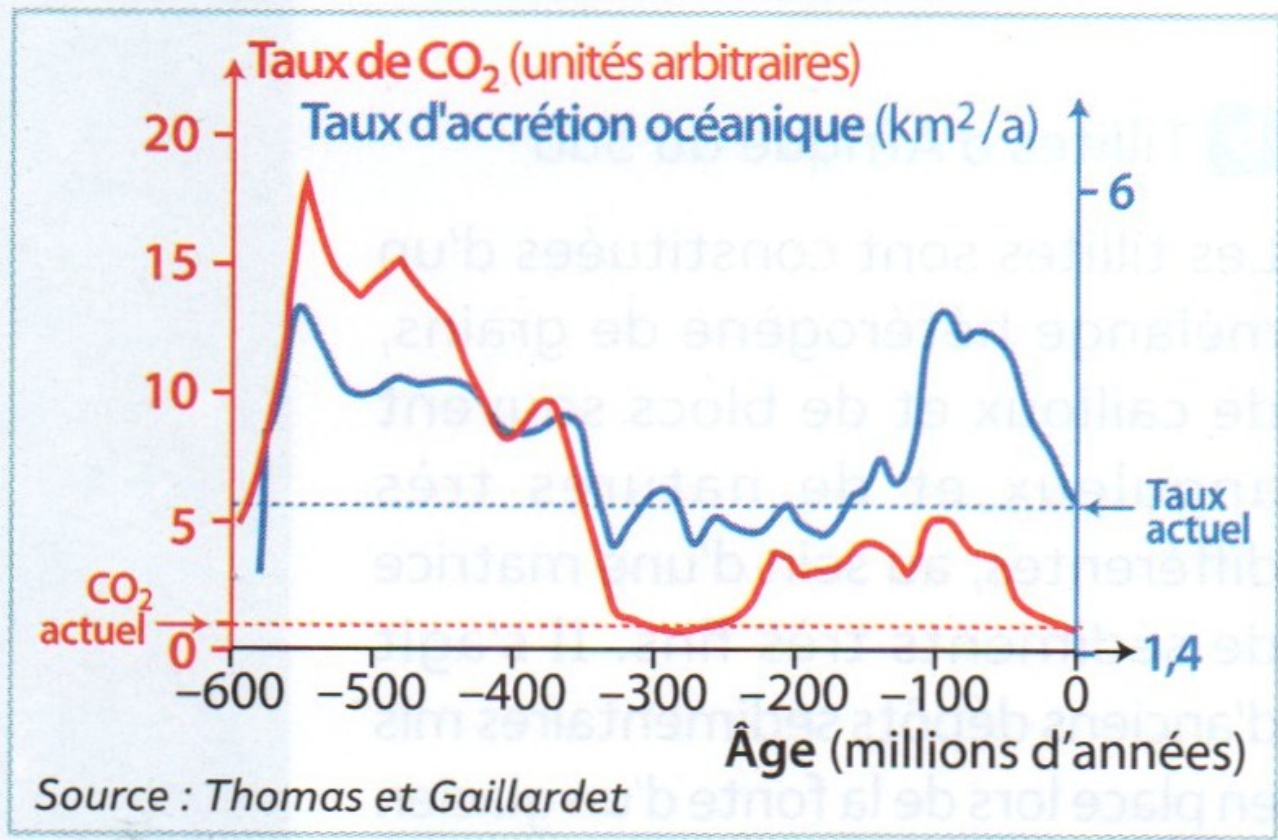
Carte de répartition actuelle des larges provinces ignées du Crétacé.

Les larges provinces ignées (LIP) sont de gigantesques coulées de lave liées à un volcanisme de point chaud. Lors de la mise en place des trapps du Deccan (LIP de la limite Crétacé-Cénozoïque), les émissions de CO_2 ont été évaluée entre 11 et 200 Gt par éruption, soit 1690 Gt de CO_2 en tout pour 2 à 3 millions de km^3 de lave émis (Gt : milliard de tonnes).



Évolution plusieurs paramètres au cours du Crétacé : concentration atmosphérique en CO_2 , intensité de l'altération continentale (déterminée par le $\delta^{87}\text{Sr}$), flux de magma liés aux LIP ou aux dorsales et volume des fosses de subduction.

(Belin, Ed. 2020, p.325)



Évolution de la vitesse relative
d'expansion océanique et du taux de CO₂