

Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

Terminale spécialité SVT – Chapitre 13

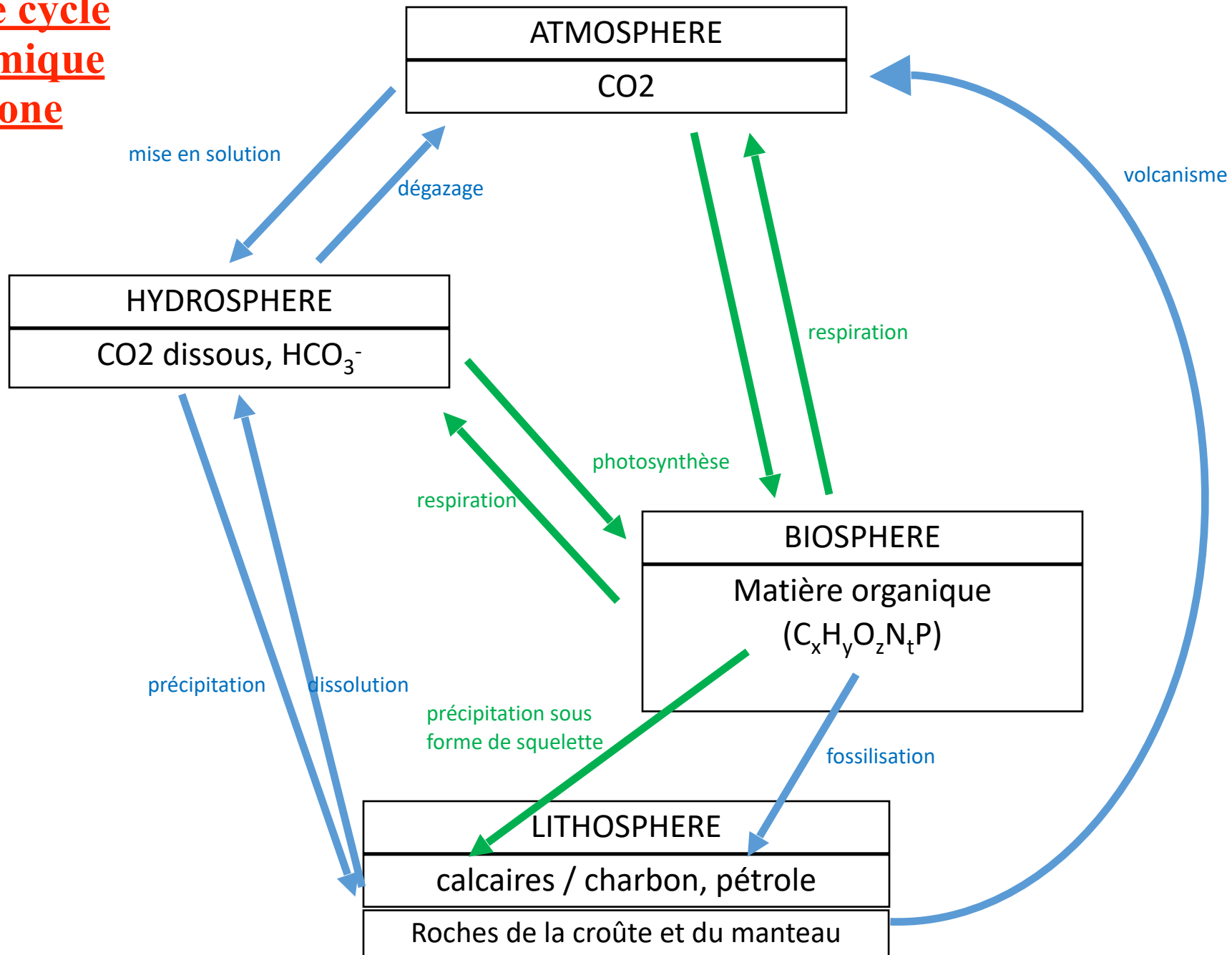
Rappels de définitions :
(cours Terminale Enseignement Scientifique)

La différence entre météo et climat

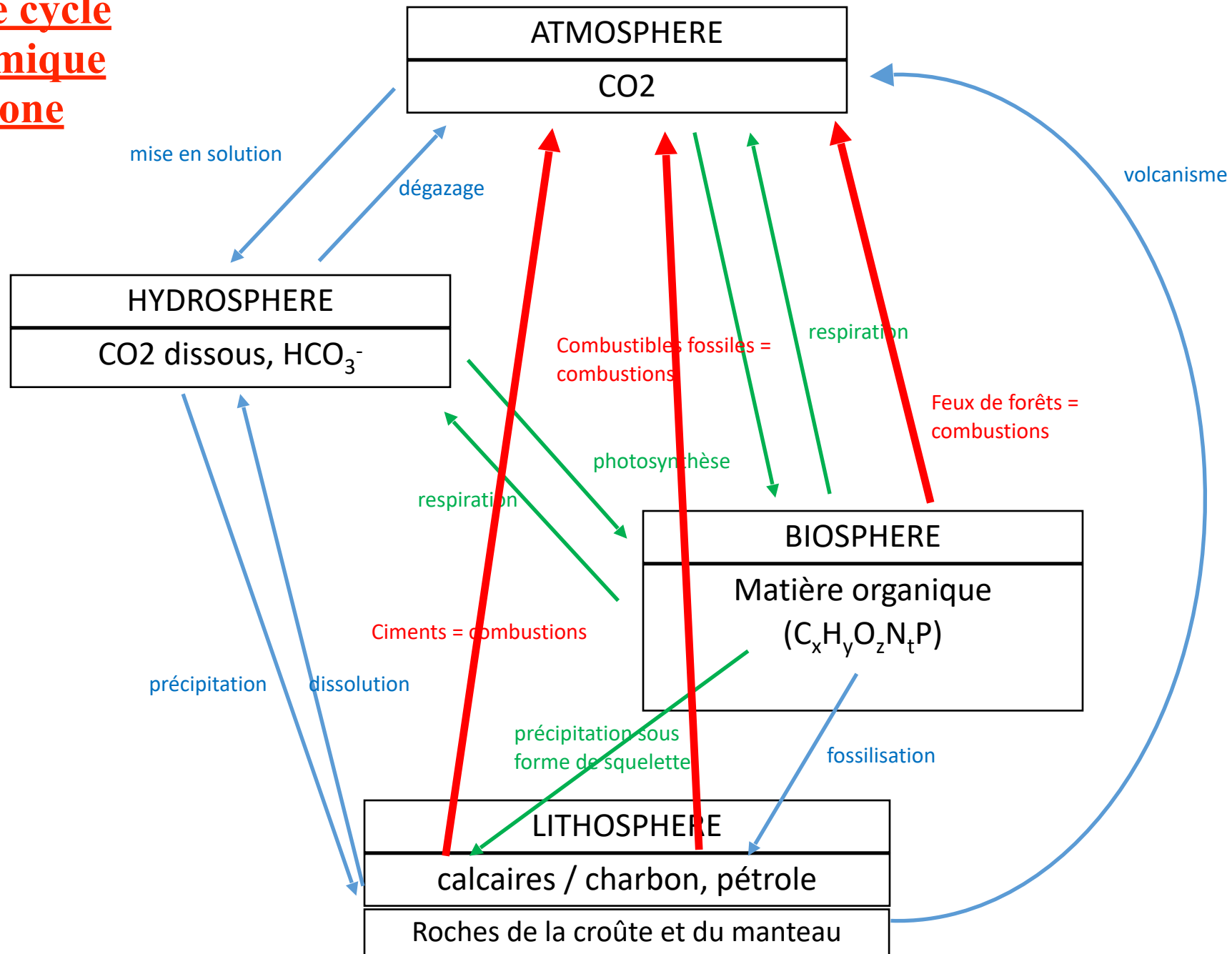
La **climatologie** est l'étude de l'état statistique moyen de l'atmosphère, locale ou globale à moyen ou long terme (années, siècles, millénaires,...).

La **météorologie** étudie les phénomènes atmosphériques (nuages, précipitations, vent,...) pour comprendre comment ils se forment, évoluent,...mais à court terme (jours, semaines).

Rappel : le cycle biogéochimique du carbone

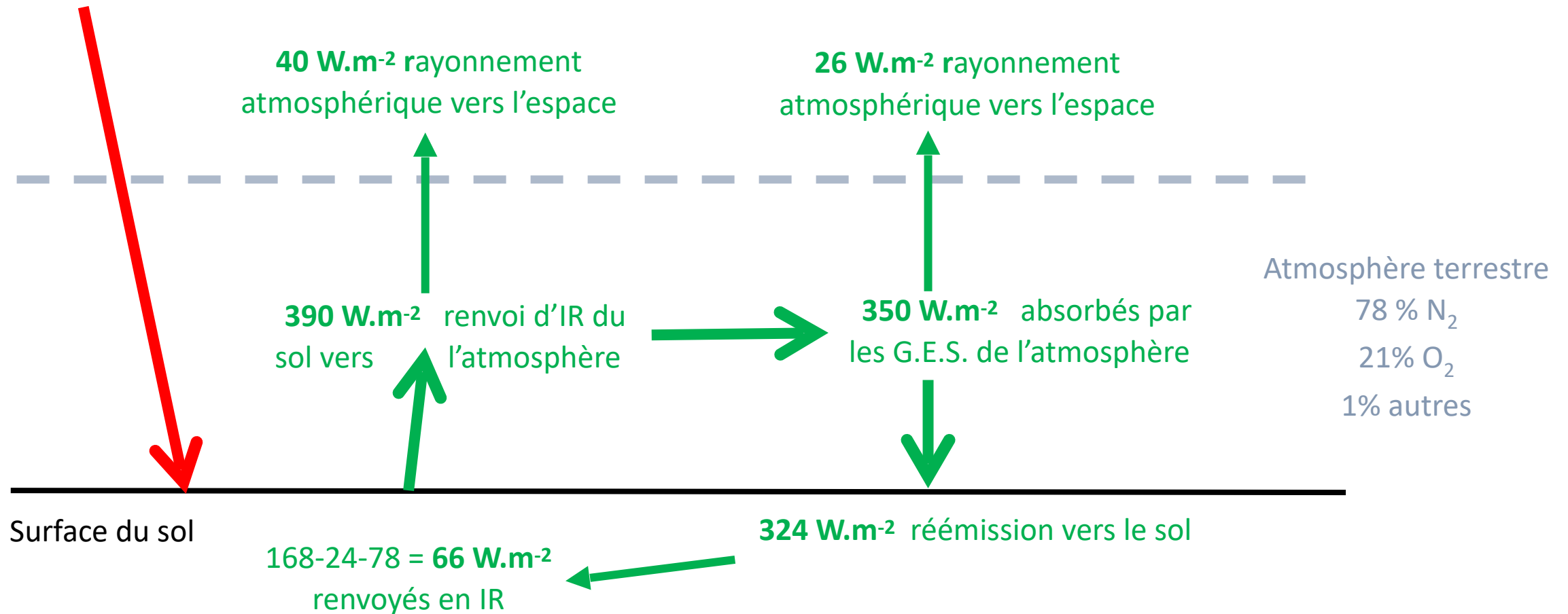


Rappel : le cycle biogéochimique du carbone



Rappel : cours de 1^{ère} Enseignement Scientifique

Rayonnement solaire
incident (visible)



**Rappel : Une partie
du bilan radiatif de
la Terre**

Cet équilibre dynamique permet de maintenir une température moyenne de $+15^\circ\text{C}$ à la surface du globe.

Rayonnement solaire
incident (visible)

40 W.m⁻² rayonnement
atmosphérique vers l'espace

26 W.m⁻² rayonnement
atmosphérique vers l'espace

390 W.m⁻² renvoi d'IR du
sol vers l'atmosphère

350 W.m⁻² absorbés par
les **G.E.S.** de l'atmosphère

Atmosphère terrestre
78 % N₂
21% O₂
1% autres

Surface du sol

168-24-78 = 66 W.m⁻²
renvoyés en IR

324 W.m⁻² réémission vers le sol

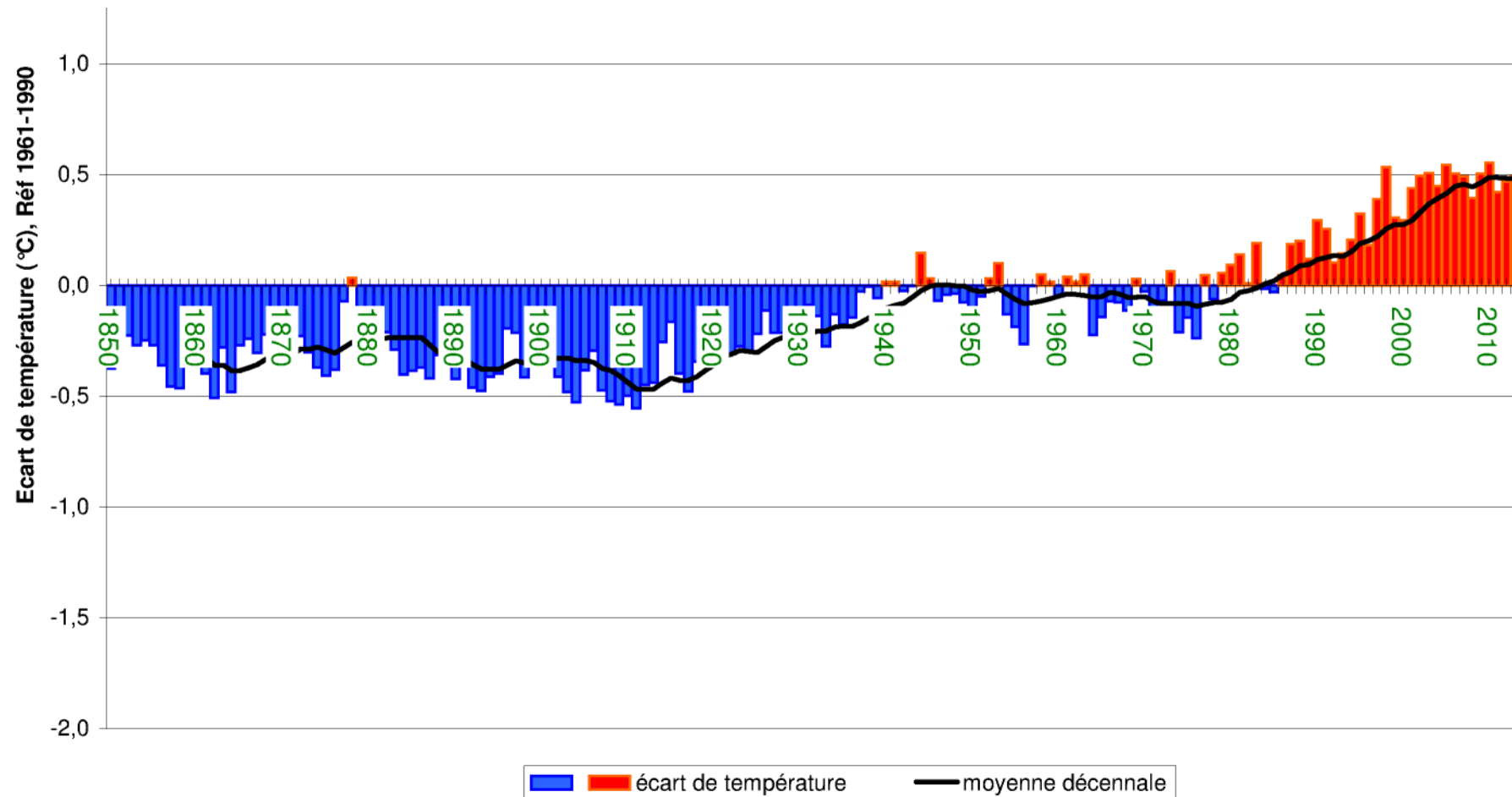
+++

**Rappel : Une partie
du bilan radiatif de
la Terre**

D'où l'augmentation de température actuelle...

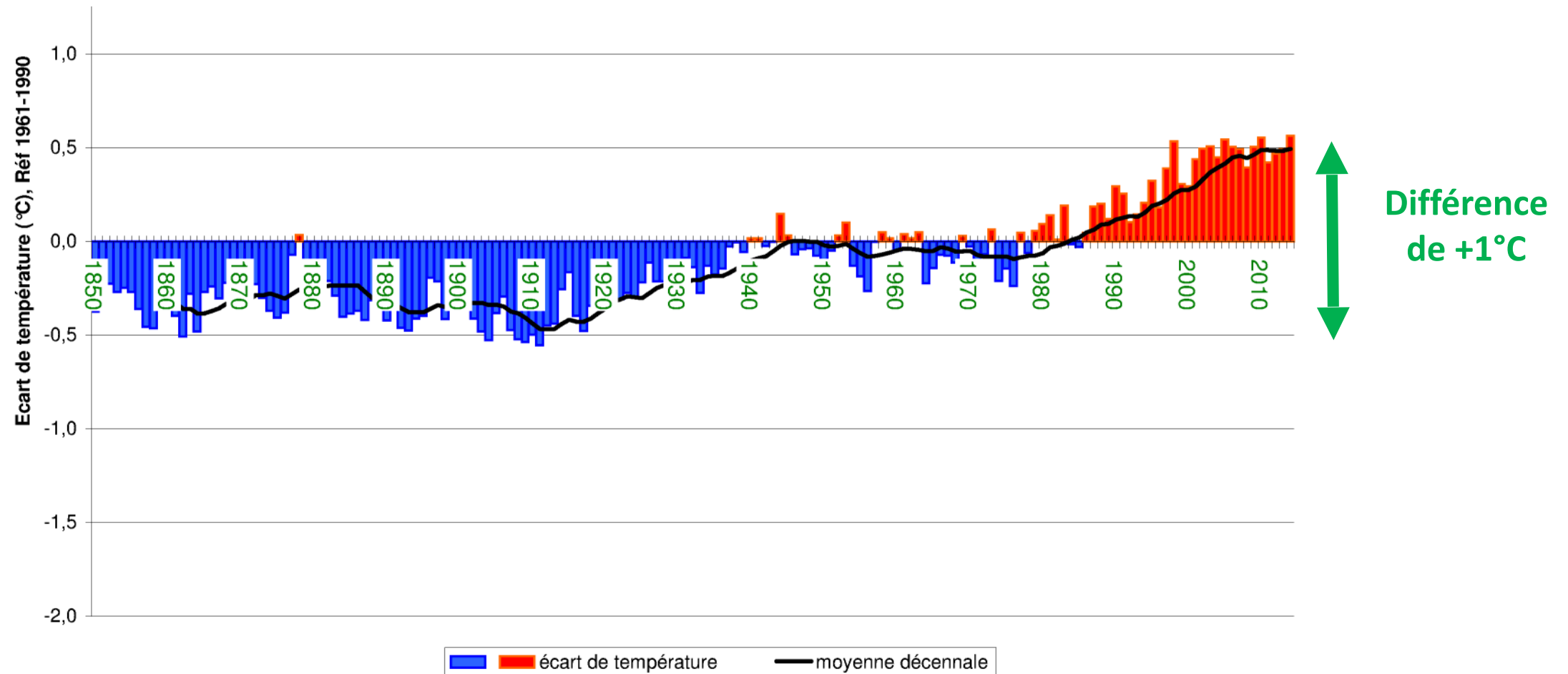
*Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence :
température moyenne du globe (données du Climatic Research Unit, University of East Anglia).*

Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0 °C).



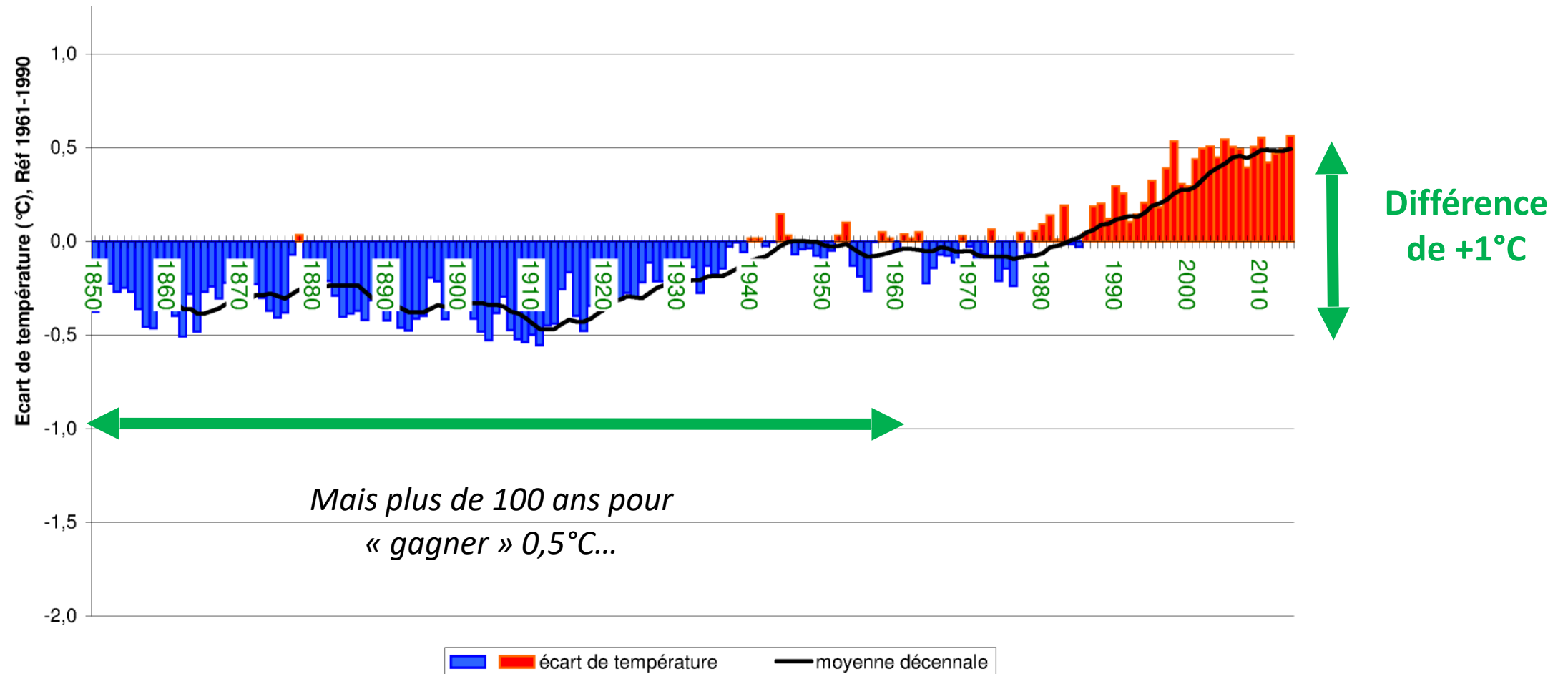
*Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence :
température moyenne du globe (données du Climatic Research Unit, University of East Anglia).*

Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0 °C).



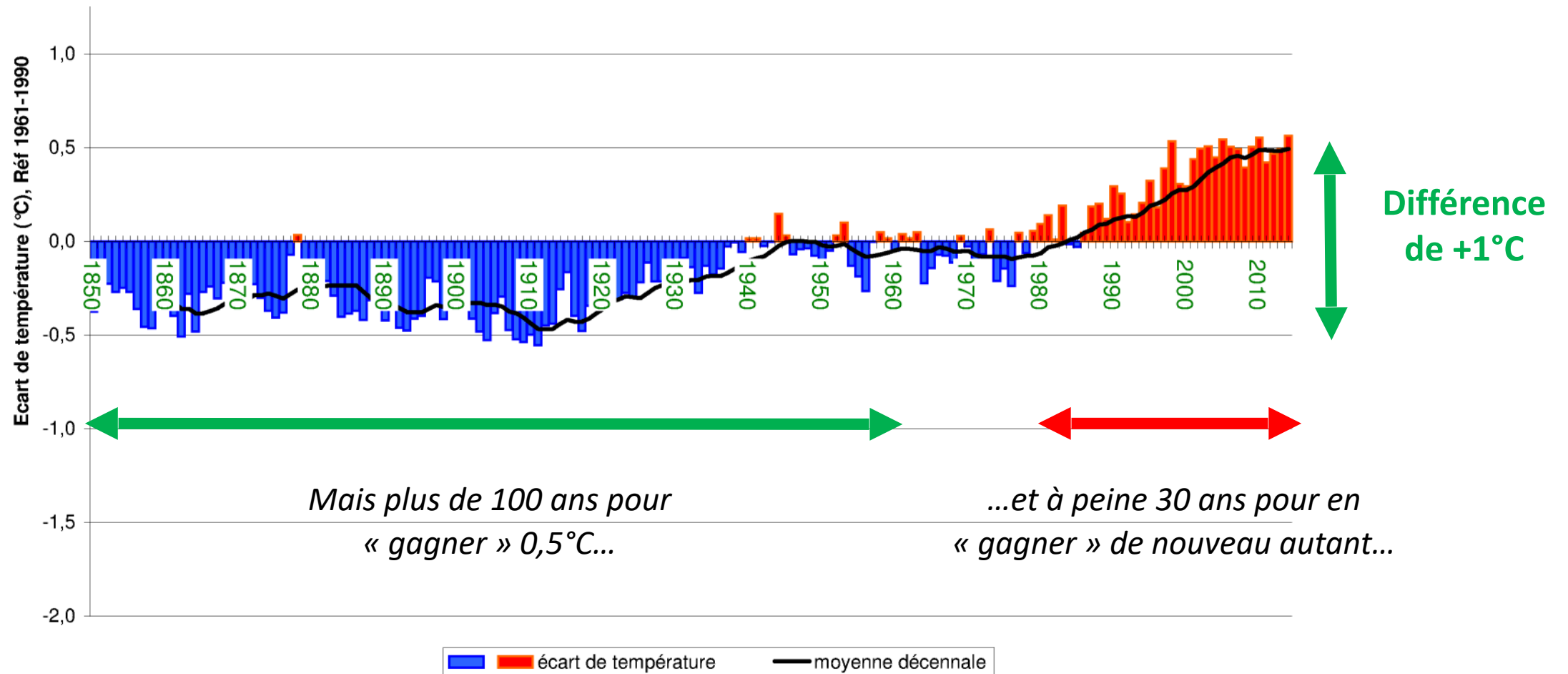
*Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence :
température moyenne du globe (données du Climatic Research Unit, University of East Anglia).*

Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0 °C).



*Anomalie de la température moyenne annuelle de l'air, en surface, par rapport à la normale de référence :
température moyenne du globe (données du Climatic Research Unit, University of East Anglia).*

Le zéro correspond à la moyenne de l'indicateur sur la période 1961-1990, soit 14,0 °C).







Rivière gelée au XVI^{ème} siècle en Europe (Hollande) - Pieter BREUGEL (1526-1569), *Paysage d'hiver*.



Février 1895 – Traversée à pied de la Seine gelée à Rouen



Hiver 1891 – Seine gelée à Paris près du Pont Royal

Problématiques du chapitre

Comment mesurer, quantifier les variations climatiques dans le passé récent ou plus ancien ?

Comment expliquer ces variations climatiques dont l'origine n'est pas anthropique ?

En quoi cette étude des climats passés aide-t-elle la compréhension de la variation climatique actuelle ?

Plan du chapitre

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

B) Les variations cycliques du climat

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

B) Une hypothèse orogénique

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

B) ...et une cause de grande profondeur

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

B) Une origine mixte

Plan du chapitre

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

B) Les variations cycliques du climat

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

B) Une hypothèse orogénique

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

B) ...et une cause de grande profondeur

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

B) Une origine mixte

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids



Glacier du Tour, vallée de Chamonix, Haute Savoie – ©P.Baly

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids



L'aiguille verte (4122 m) et les Drus (3730 m), au-dessus de la vallée de Chamonix, Haute Savoie – © P.Baly

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids



La vallée du Rhône à la hauteur de Martigny, Suisse – © P.Baly

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids



Val Vénì, avec la moraine latérale du glacier du Miage, Italie – © P.Baly

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids



Glacier Athabasca, Alberta, Canada – © photo P.Baly

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

1) Les traces continentales des climats froids



Moraines latérales

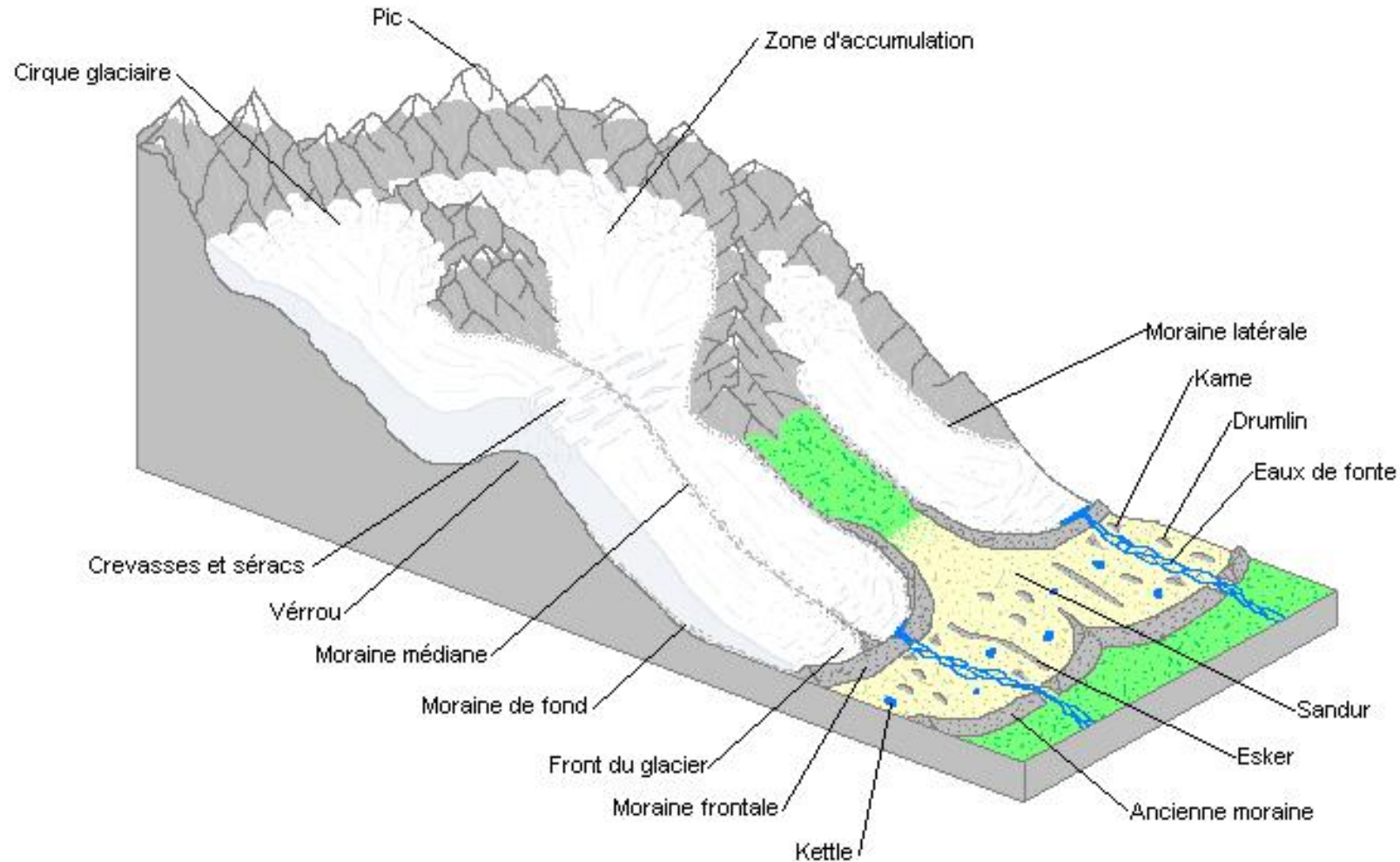
Glacier Athabasca, Canada – © P.Baly

A la limite de fusion de la glace, les éléments arrachés puis transportés par le glacier s'accumulent et forment une **moraine** (qui est donc un dépôt de grains de toute taille)

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

1) Les traces continentales des climats froids



I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

1) Les traces continentales des climats froids



I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

1) Les traces continentales des climats froids

Les stries glaciaires sur les roches moutonnées sont les témoins du passage d'un glacier.



Plan du chapitre

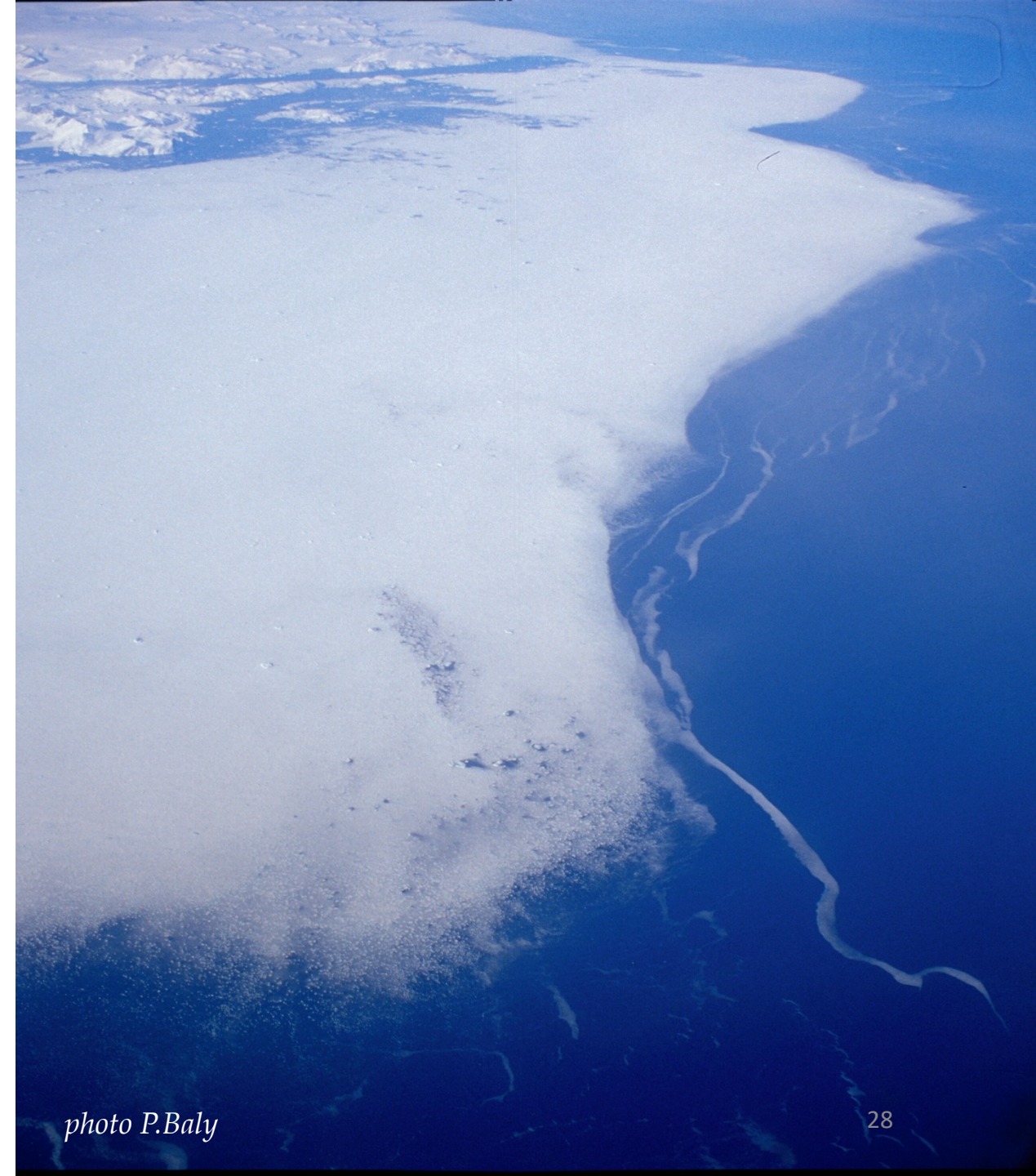
- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires

Vue aérienne sur le sud du
Groenland

La banquise en avril.

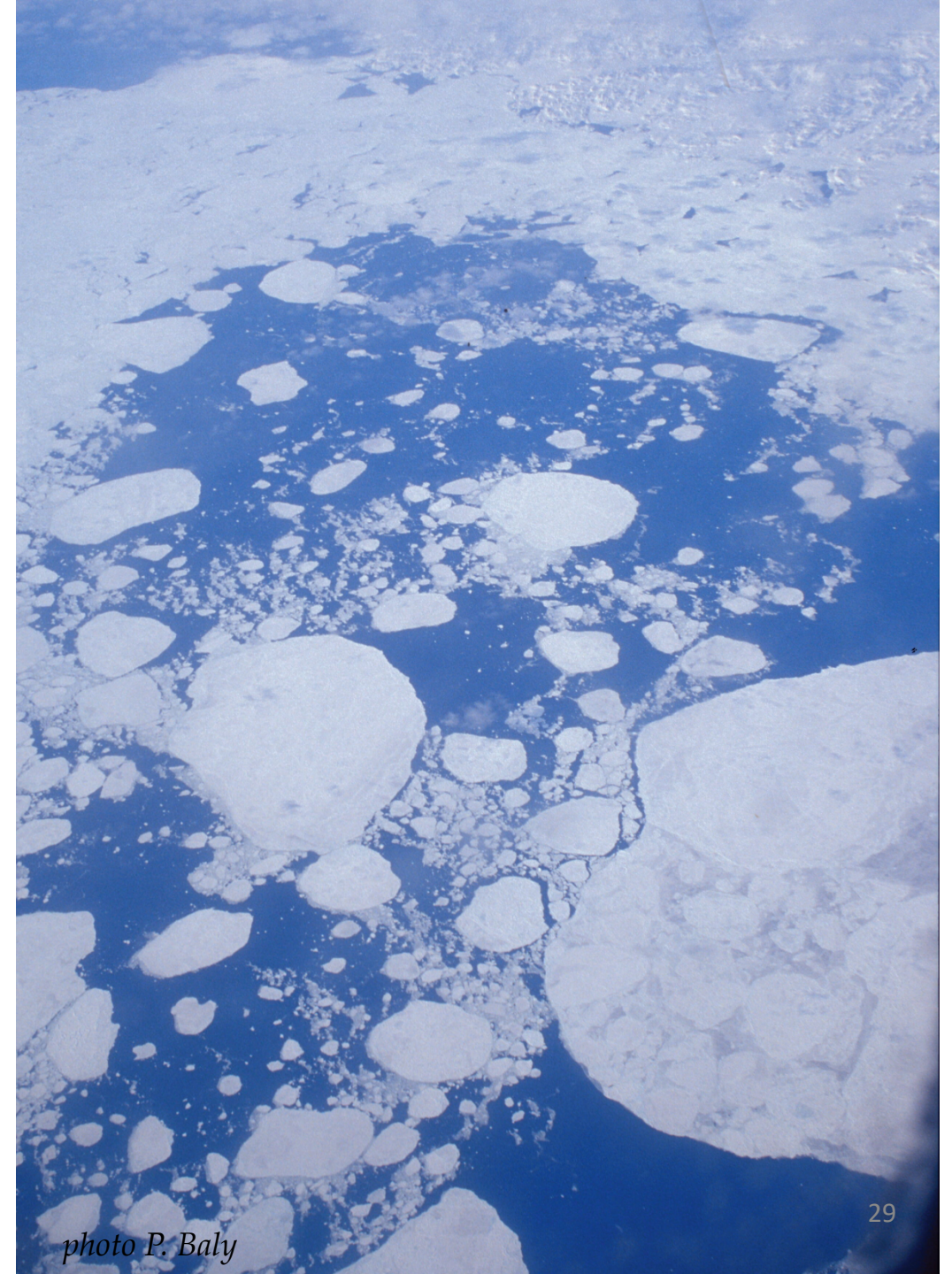
Le continent est visible au loin...



- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires

Vue aérienne du sud du Groenland

En avril, la banquise se disloque et forme des icebergs.



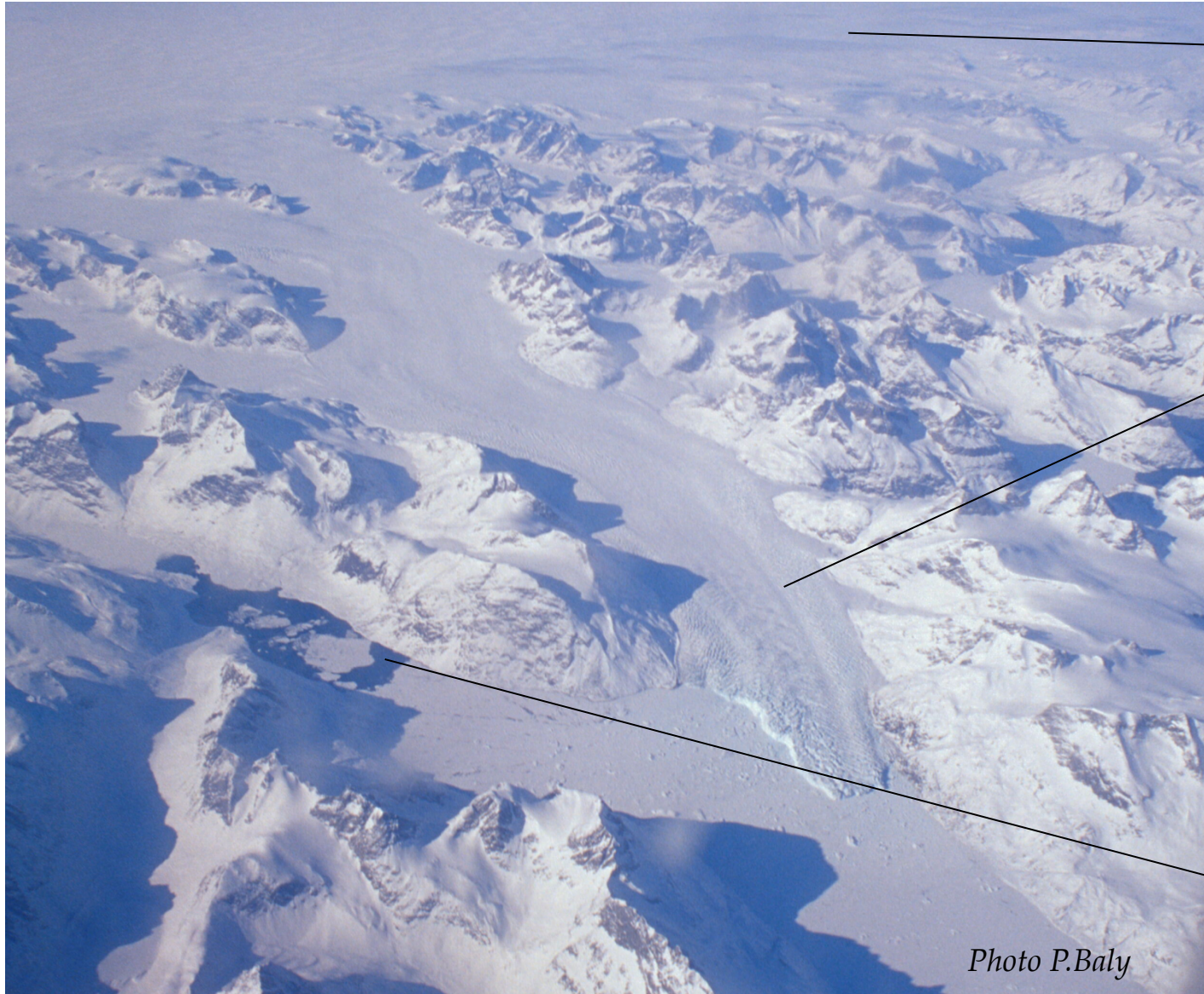
1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Vue aérienne du sud du
Groenland en avril



Haut plateau
recouvert par
une calotte de
neige....

...qui se tasse et
flue sur les
bordures du
plateau vers la
mer, donnant
naissance à des
glaciers.

Photo P.Baly

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



Ces glaciers terminent leur course dans la mer, en se détachant, et en formant de gigantesques icebergs

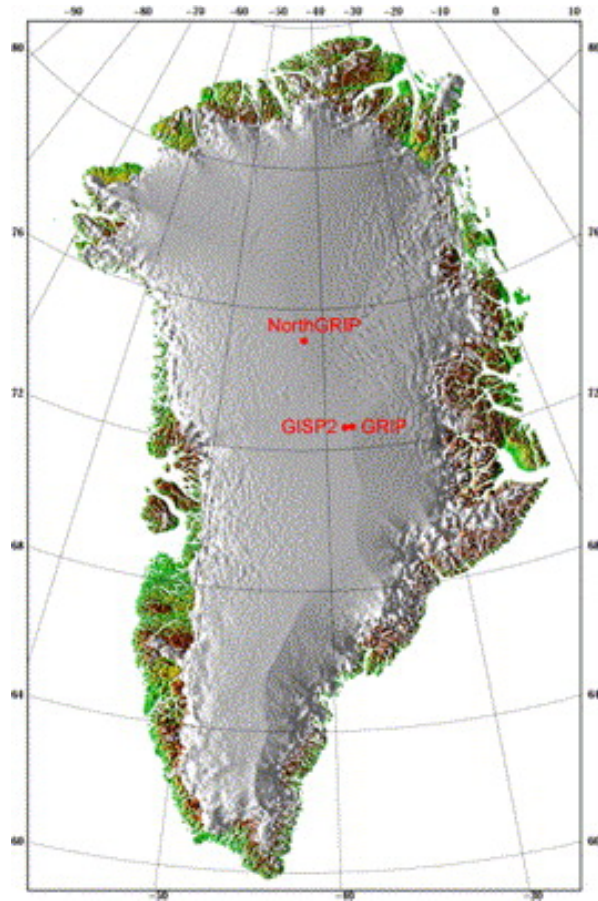
Photo livre SVT spécialité - Nathan

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

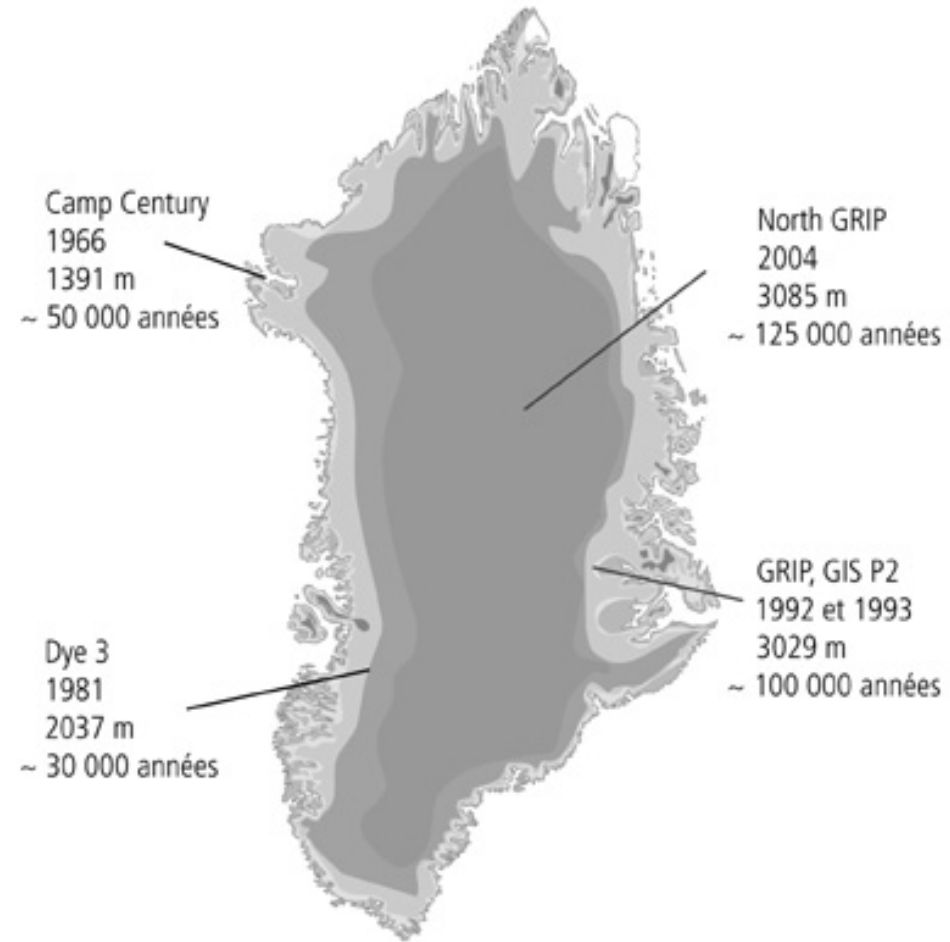
A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



<http://www.insu.cnrs.fr/images/2034>



<https://journals.openedition.org/histoire-cnrs/5782>

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

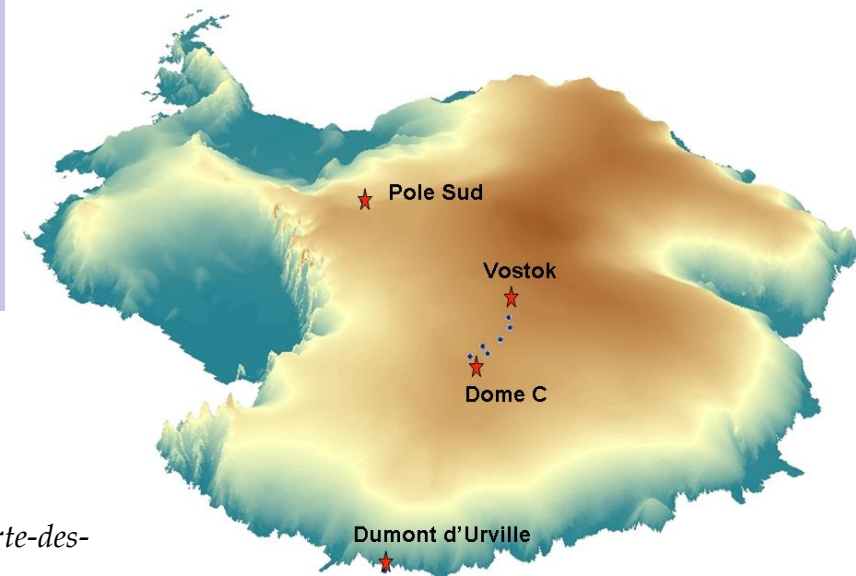
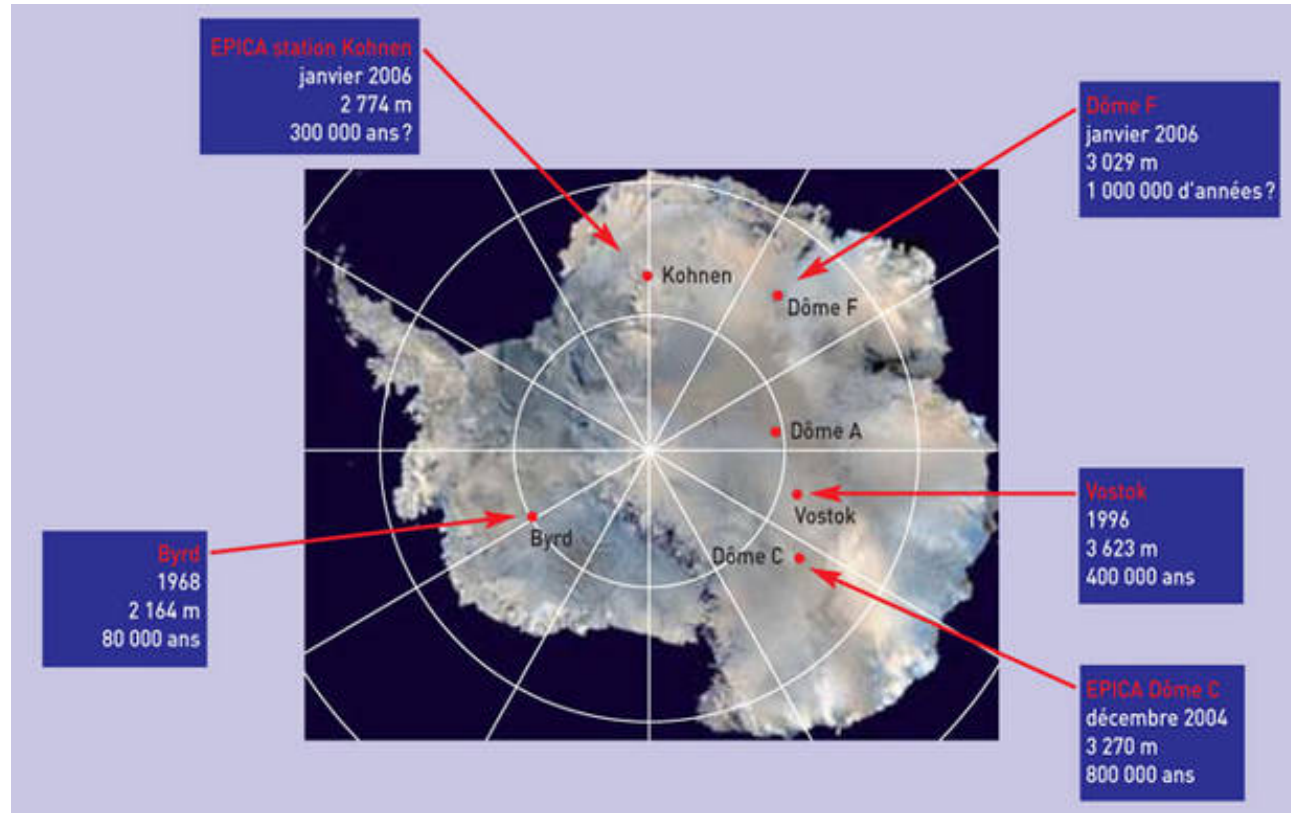


1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



<http://www.savoirs.essonne.fr/sections/ressources/dessins-schemas/photo/carte-des-forages-en-antarctique/?cHash=fafab46ec46020e0e1d306163dfc0116>

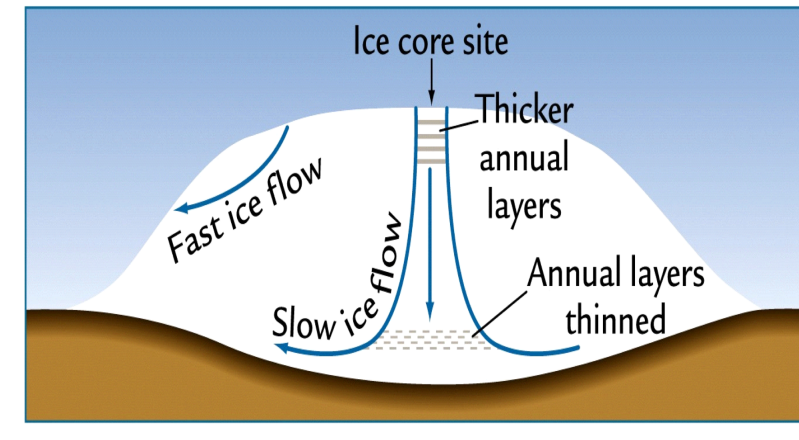
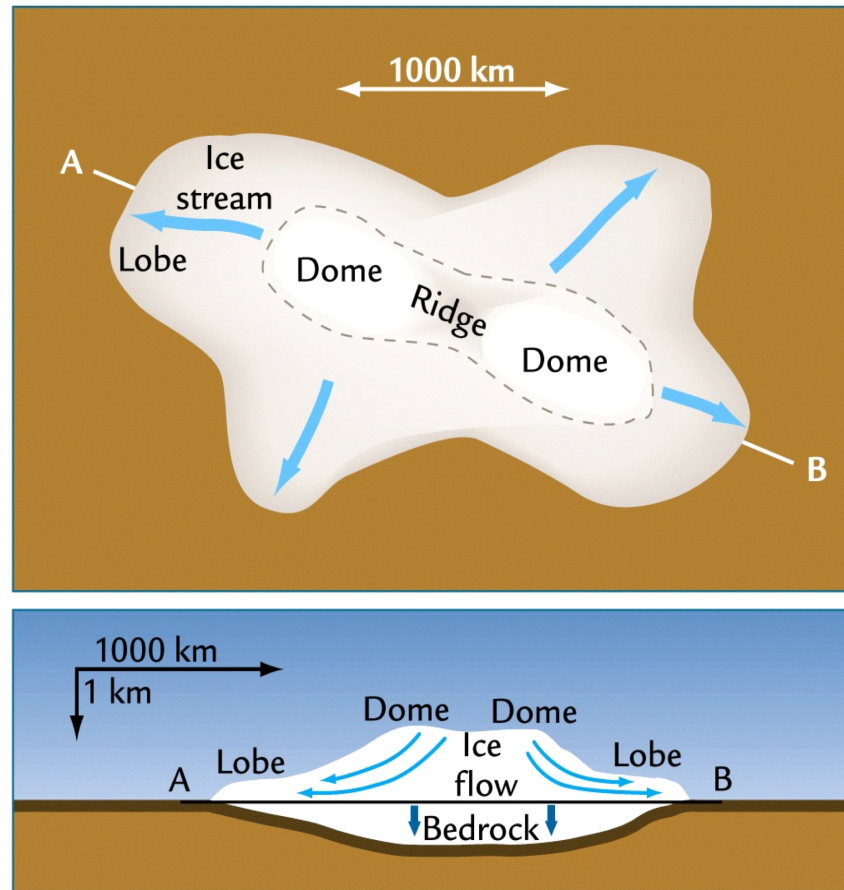
1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Les sites de forages polaires

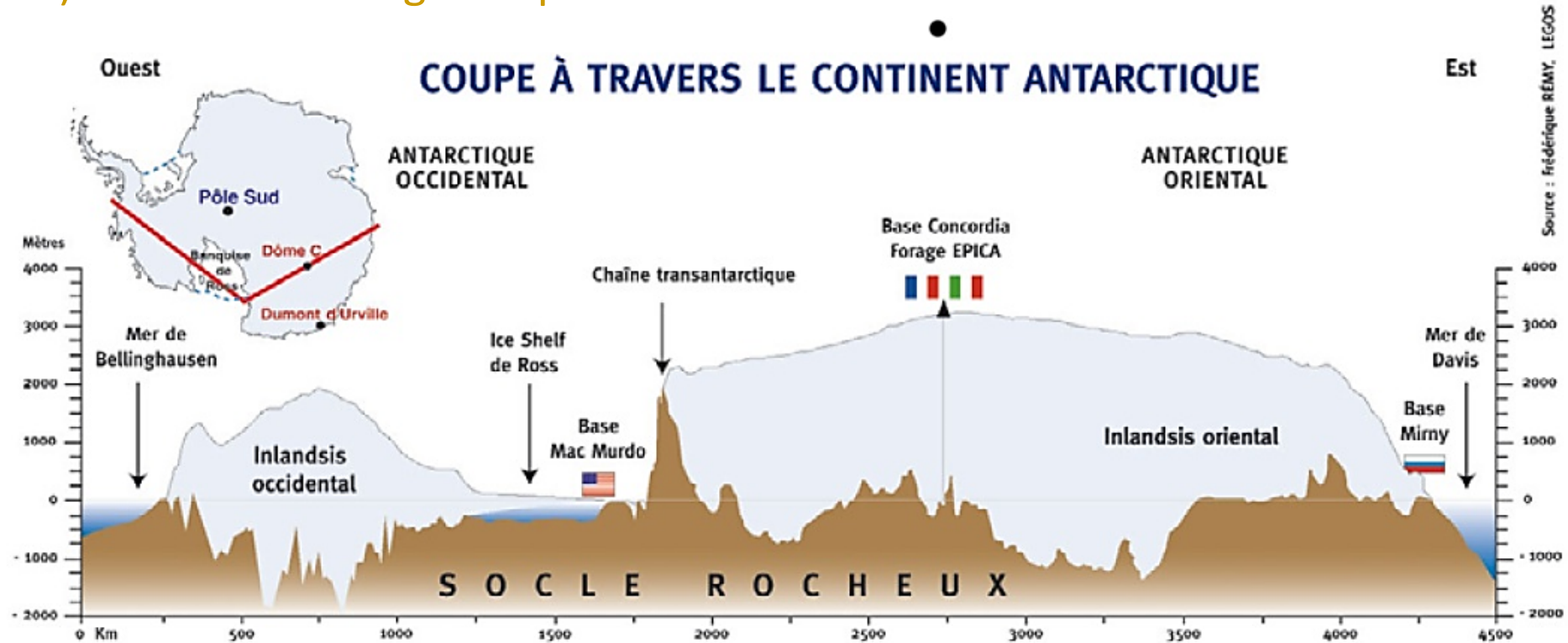


I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



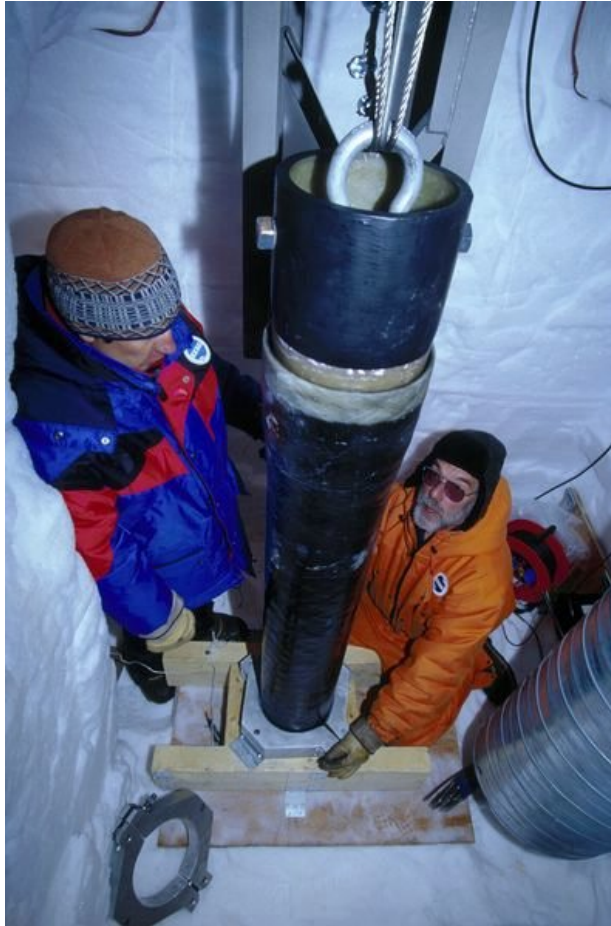
- l) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires

<http://itw-dc12.e-monsite.com/blog/voyages/>



<http://www.amaepf.fr/concordia/le-dome-c>

- 1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires



Forage à Dôme C, Antarctique (3260 m) – station Concordia
Programme EPICA (European Project of Ice coring in Antarctica)

Photos Institut Polaire Français Paul-Emile Victor

l) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

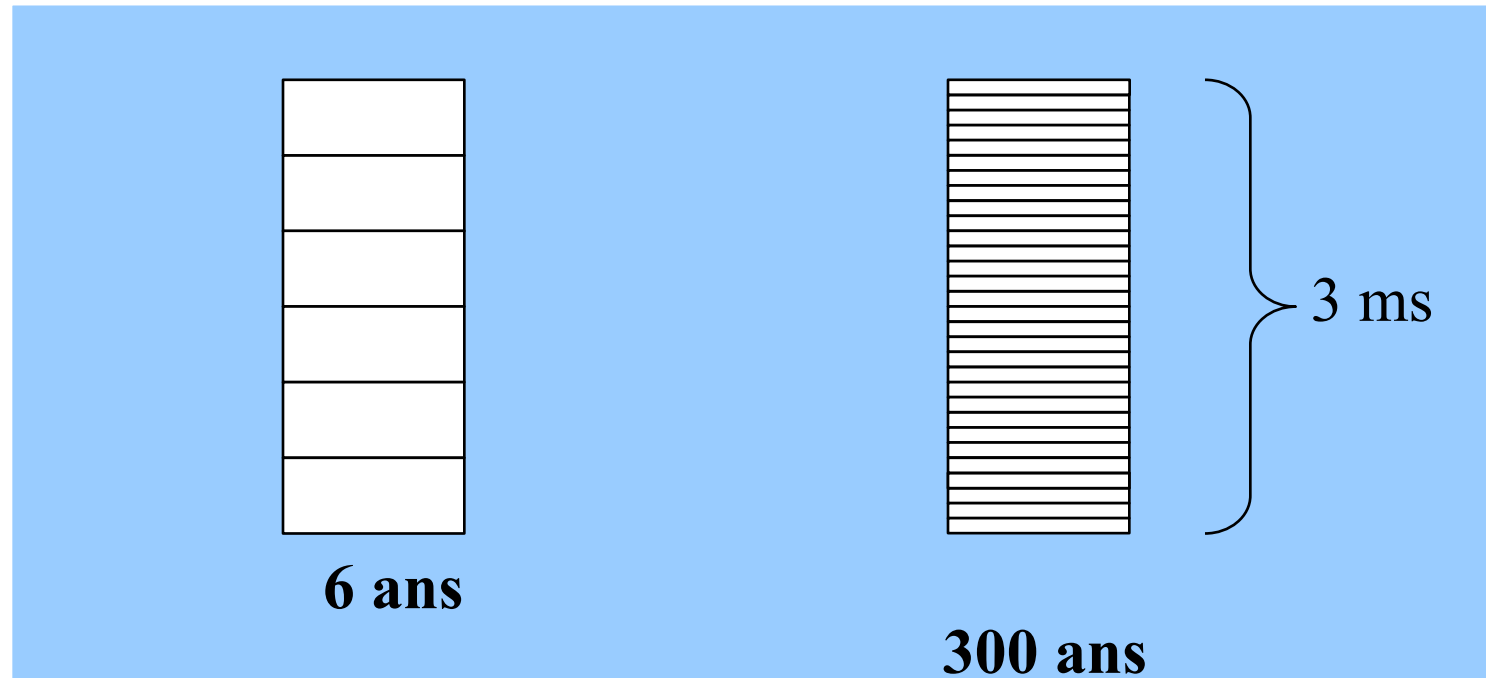
a) L'utilisation des glaces polaires

Paramètre local important

Taux d'accumulation

Groenland (Grip) :
50cm/an

Antarctique (Vostok) :
1 cm/an



1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Prélèvement de carottes de glace dans la calotte groenlandaise



Les carottes de glace sont ensuite étudiées et différents paramètres analysés :

- la composition des bulles d'air par niveau renseigne sur la teneur en gaz;
- le rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ renseigne sur les températures
- les quantités de poussières (vents catabatiques) sont aussi de bons indicateurs.

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

L'outil isotopique appliqué à H₂O (1)

- au niveau des calottes glaciaires, la neige la plus ancienne a environ 800 000 ans (sans doute 1 Ma) ;
- il est possible de mesurer, pour chaque niveau, le **rapport isotopique** de l'H₂O, c'est-à-dire la proportion de l'isotope 18 (isotope rare : 0,2 %) par rapport à l'isotope 16 (isotope fréquent : 99,7 %) :

$$R = {}^{18}O / {}^{16}O$$

Pour l'eau de mer, $R = 0,002005$ (+/- 0,000043)

Ce rapport sert de référence mondiale : c'est le Standard Mean Ocean Water (SMOW ou Vienna.SMOW).

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

L'outil isotopique appliqué à H₂O (2)

À partir de ce rapport R, on calcule le $\delta^{18}\text{O}$, qui se réfère au standard :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\text{Réchantillon} - \text{RSMOW}}{\text{RSMOW}} \times 1000$$

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

Pourquoi utiliser cet outil ?

Au fait, si vous avez suivi, quel est le $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer ?

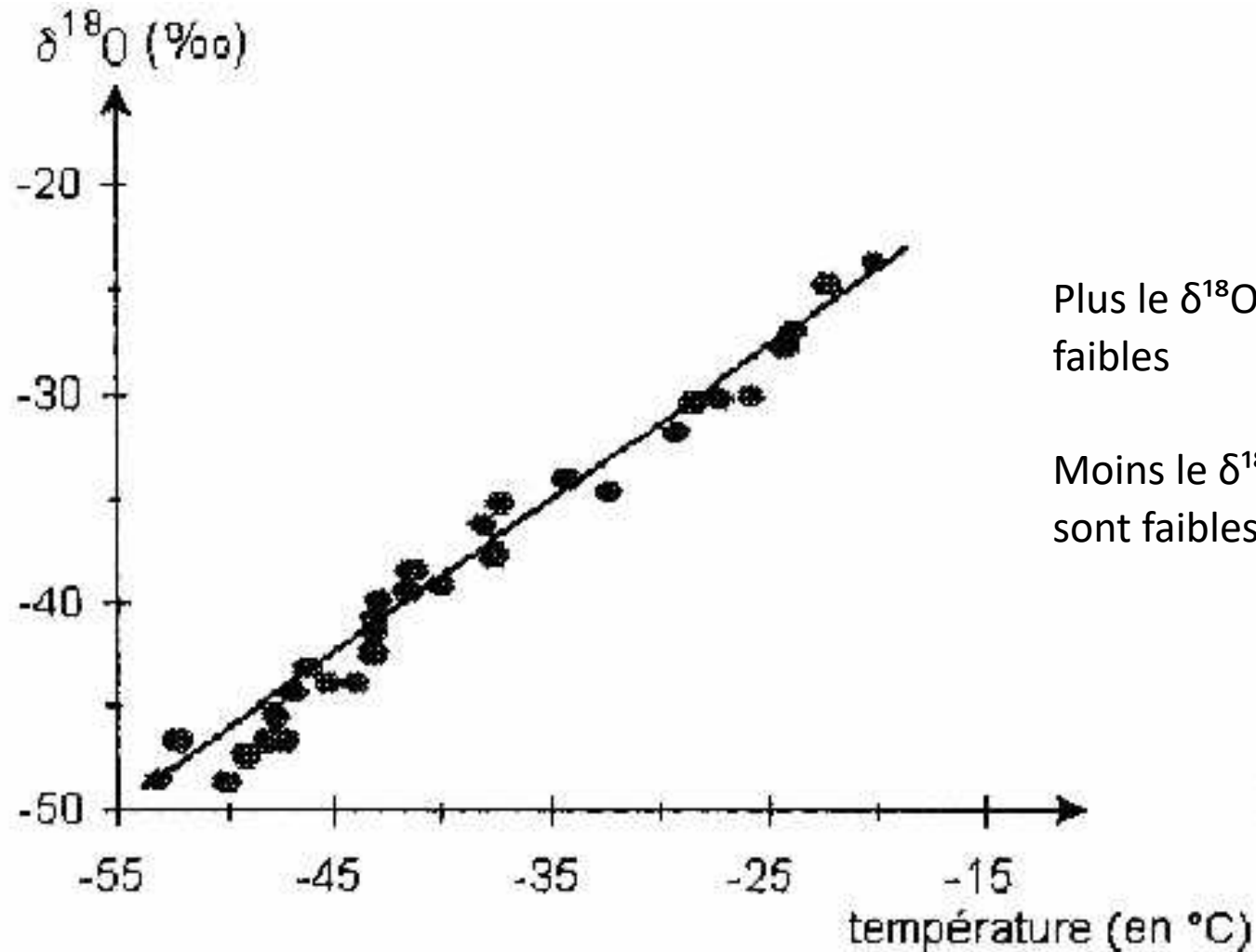
I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Le thermomètre isotopique de la neige



Plus le $\delta^{18}\text{O}$ **dans la glace** est négatif, plus les températures sont faibles

Moins le $\delta^{18}\text{O}$ **dans la glace** est négatif, moins les températures sont faibles

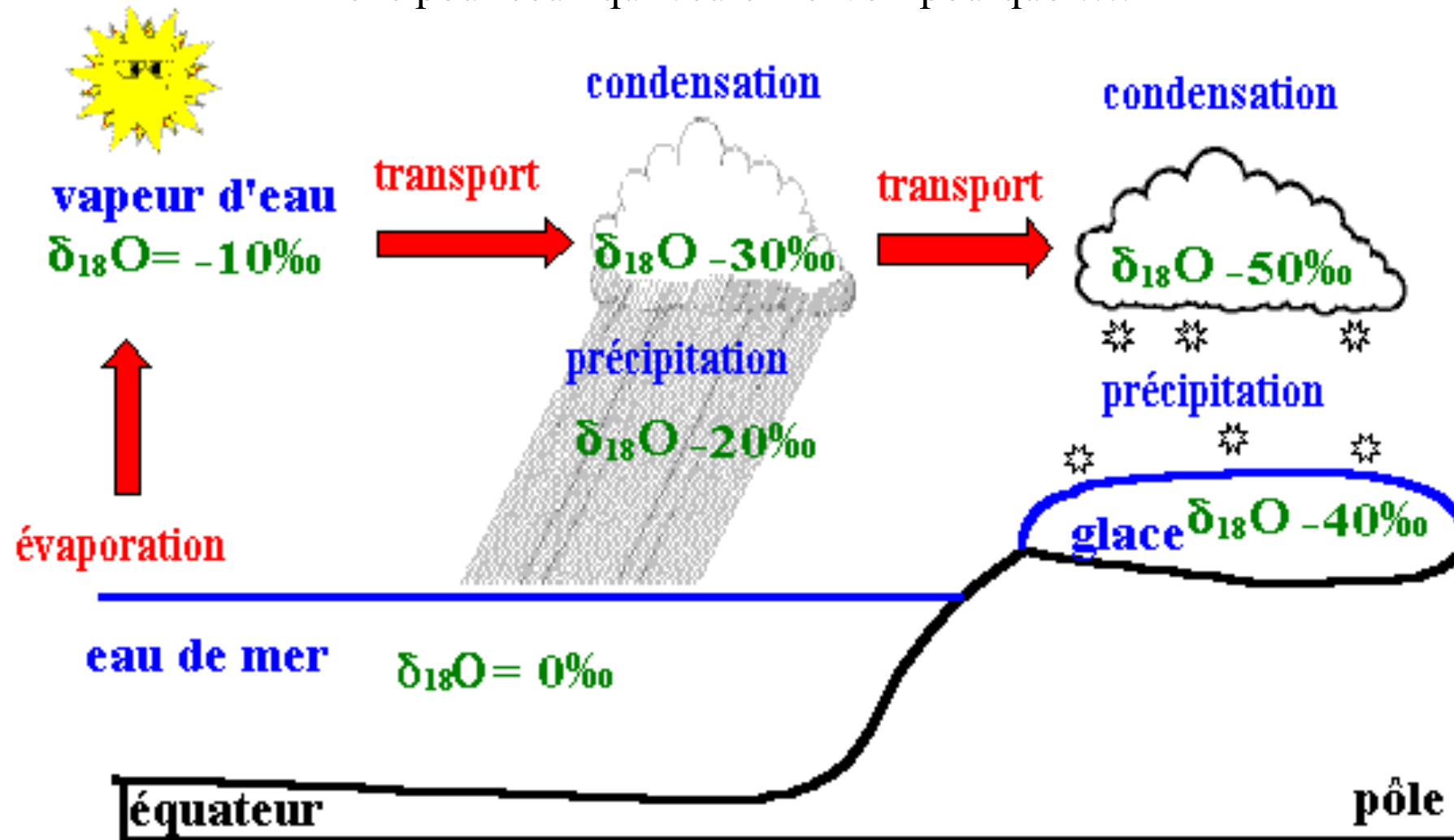
1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Annexe pour ceux qui veulent savoir pourquoi....



I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

L'outil isotopique appliqué à H₂O (3)

On peut aussi utiliser un autre isotope de la molécule d'eau : l'hydrogène (H) en réalisant la mesure, pour chaque niveau de glace, du rapport isotopique de l'isotope rare (²H ou D (deutérium) à 0,016 ‰) et de l'isotope fréquent (¹H à 99,984 ‰) :

$$R = \frac{D}{H}$$

Pour l'eau de mer, $R = 0,00015576$ (+/- 0,05) ou 155,76 ppm

Ce rapport sert de référence mondiale : c'est le Standard Mean Ocean Water (SMOW ou Vienna.SMOW).

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Et comme précédemment, on calcule alors le δD , qui se réfère au standard :

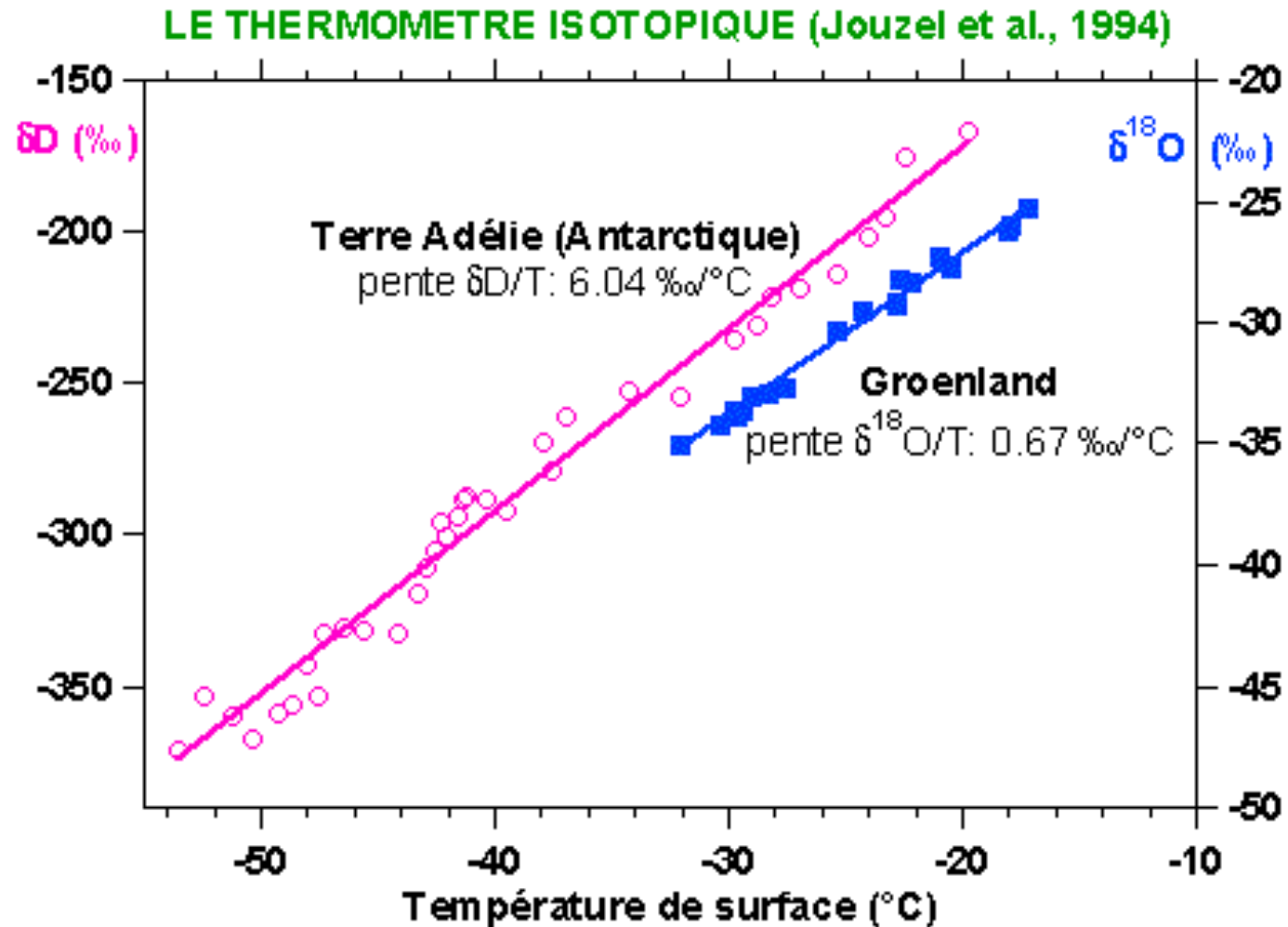
$$\delta D = \frac{\text{Réchantillon} - \text{RSMOW}}{\text{RSMOW}} \times 1000$$

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



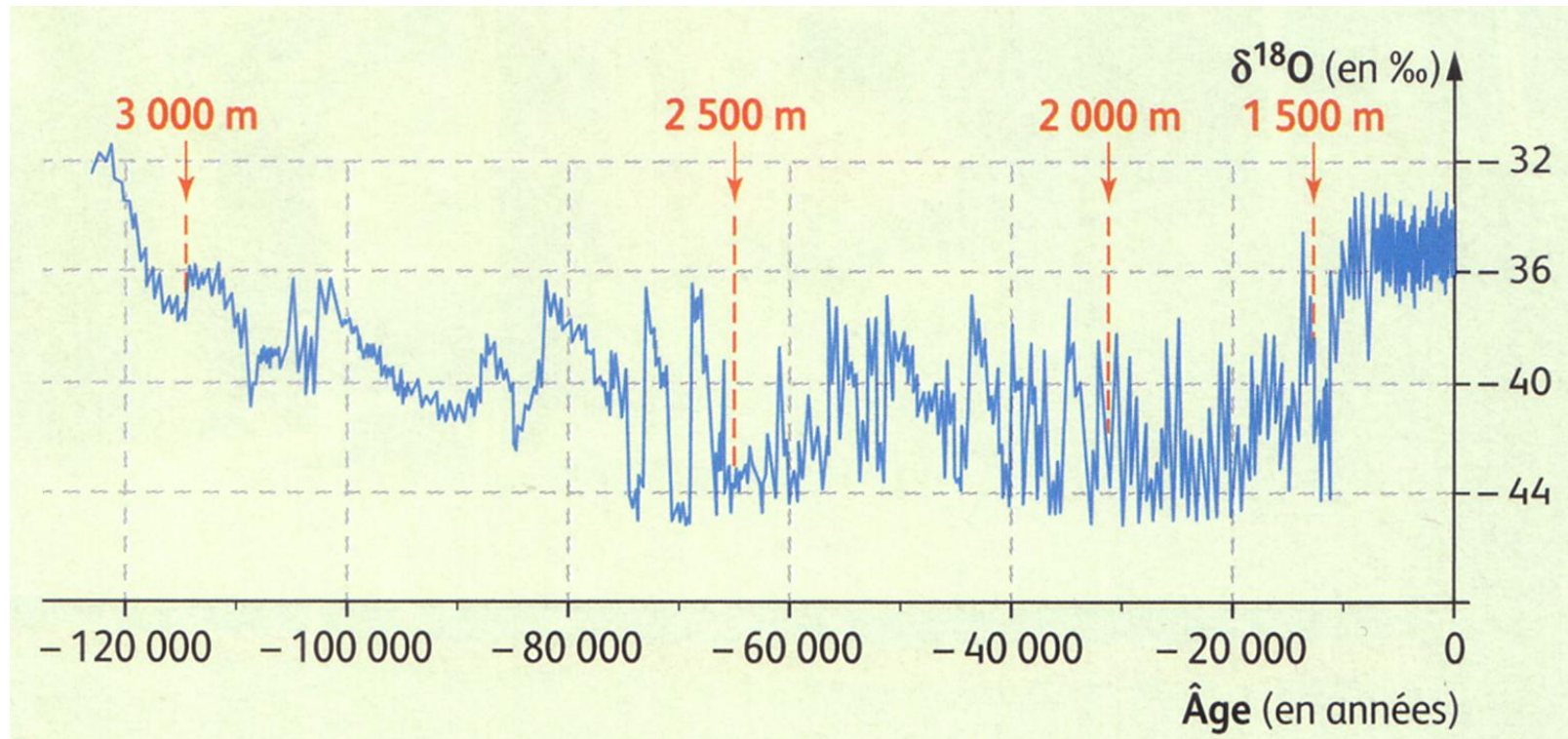
1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Résultats du forage GRIP (Greenland Ice core Project) réalisé au Groenland par 8 pays européens* et terminé en 1992, remontant jusqu'à 250 000 ans.



* Allemagne, Belgique, Danemark, France, Islande, Italie, Royaume-Uni et Suisse

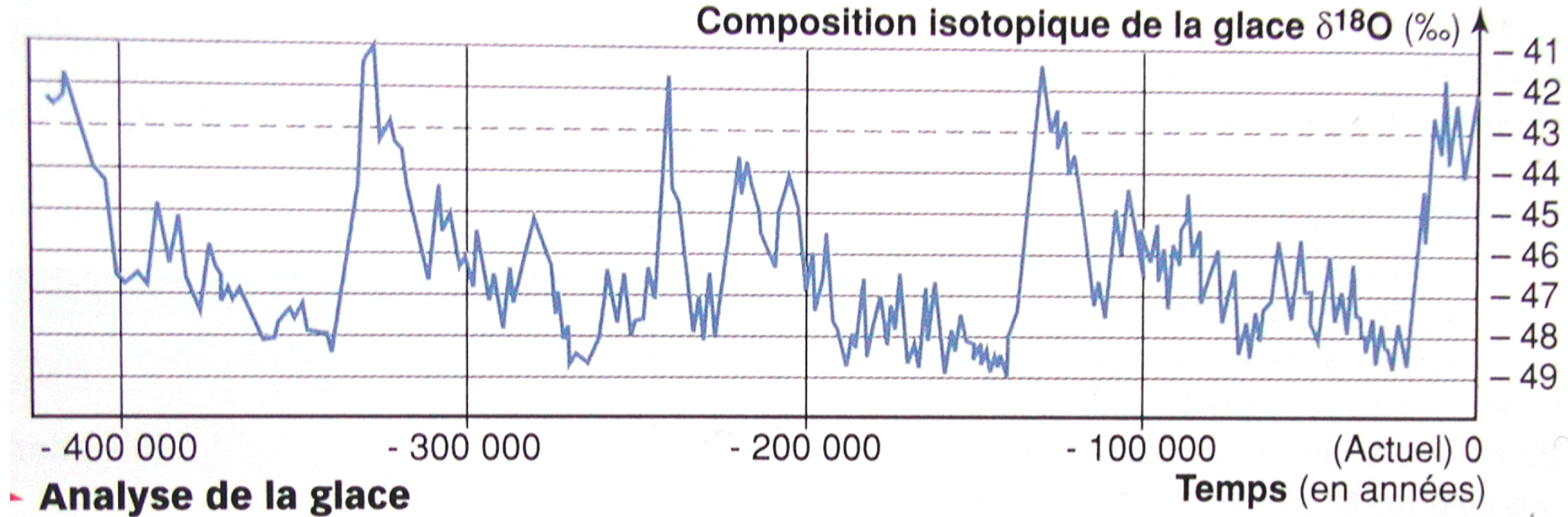
l) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Résultats obtenus à partir du forage de Dôme C (Antarctique)

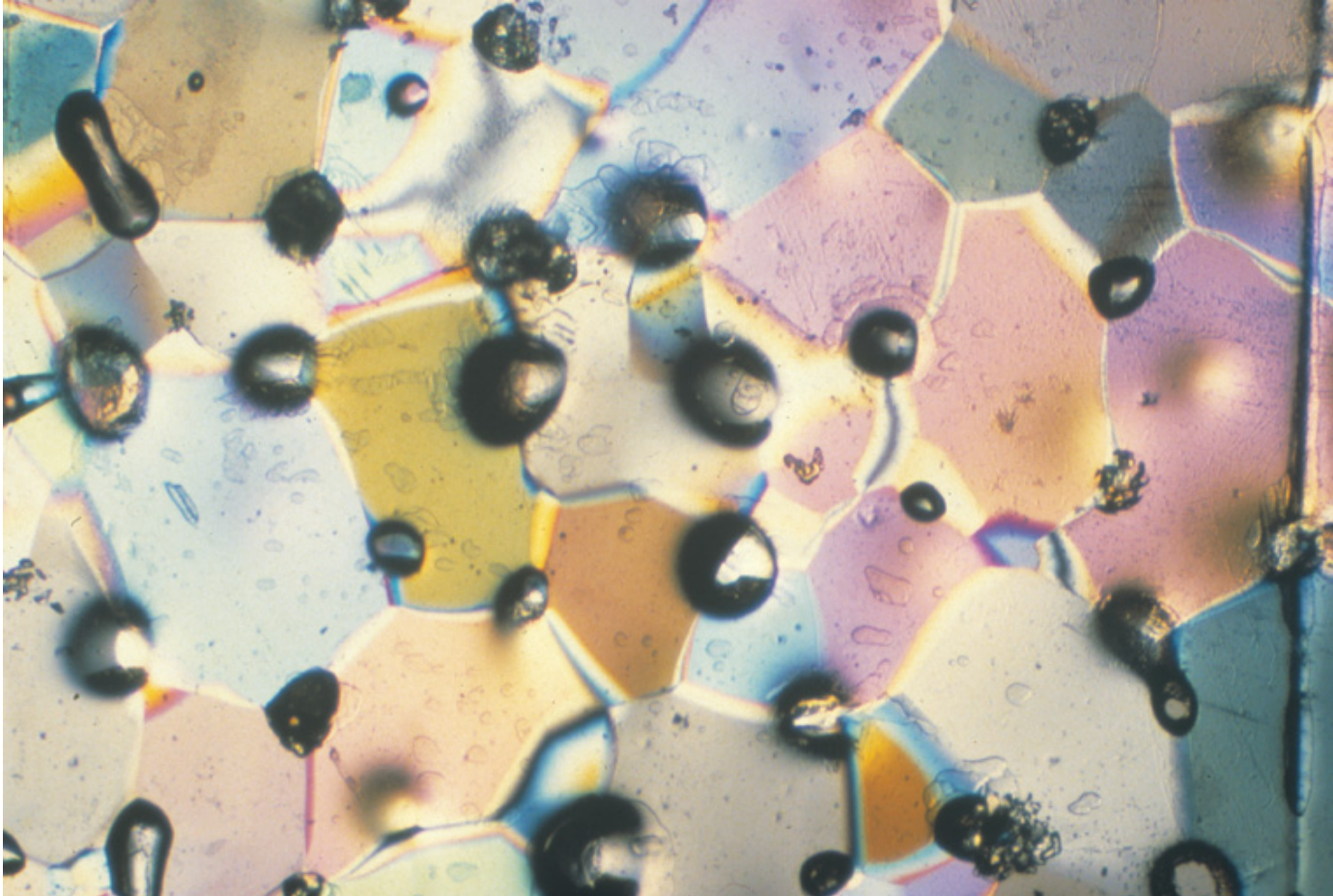


1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

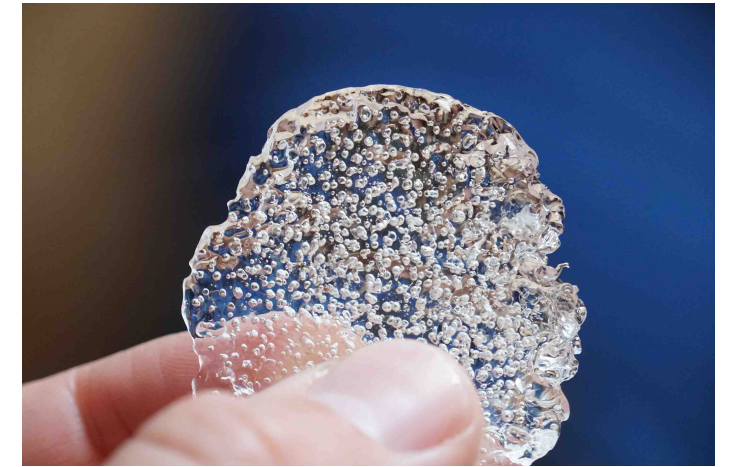
A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires



Lame mince de glace en lumière polarisée analysée



Une autre information
issue des glaces : les
gaz piégés dans les
bulles d'air

1 mm

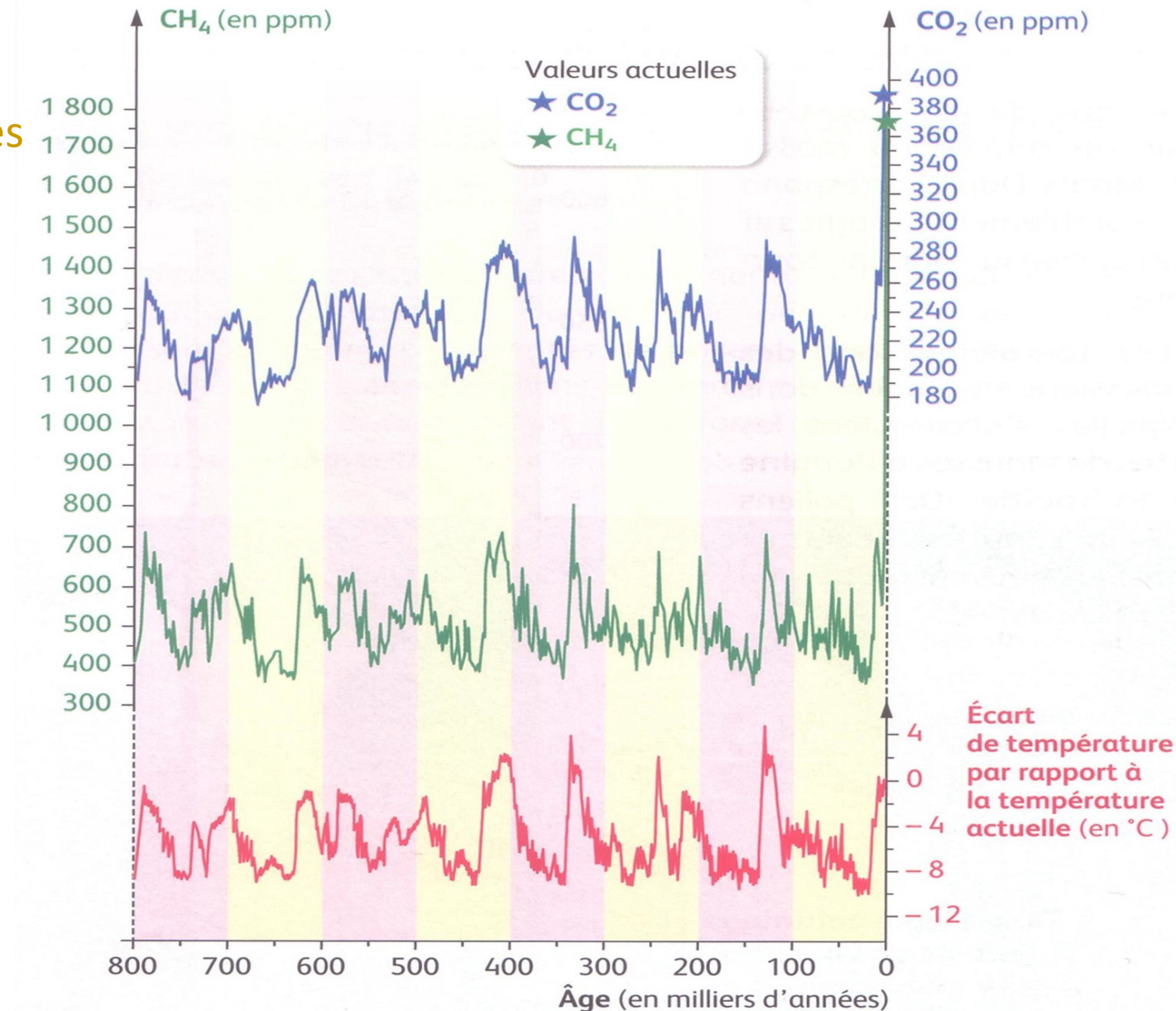
I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

Résultats obtenus à partir
des bulles de gaz du forage
de Dôme C (Antarctique)

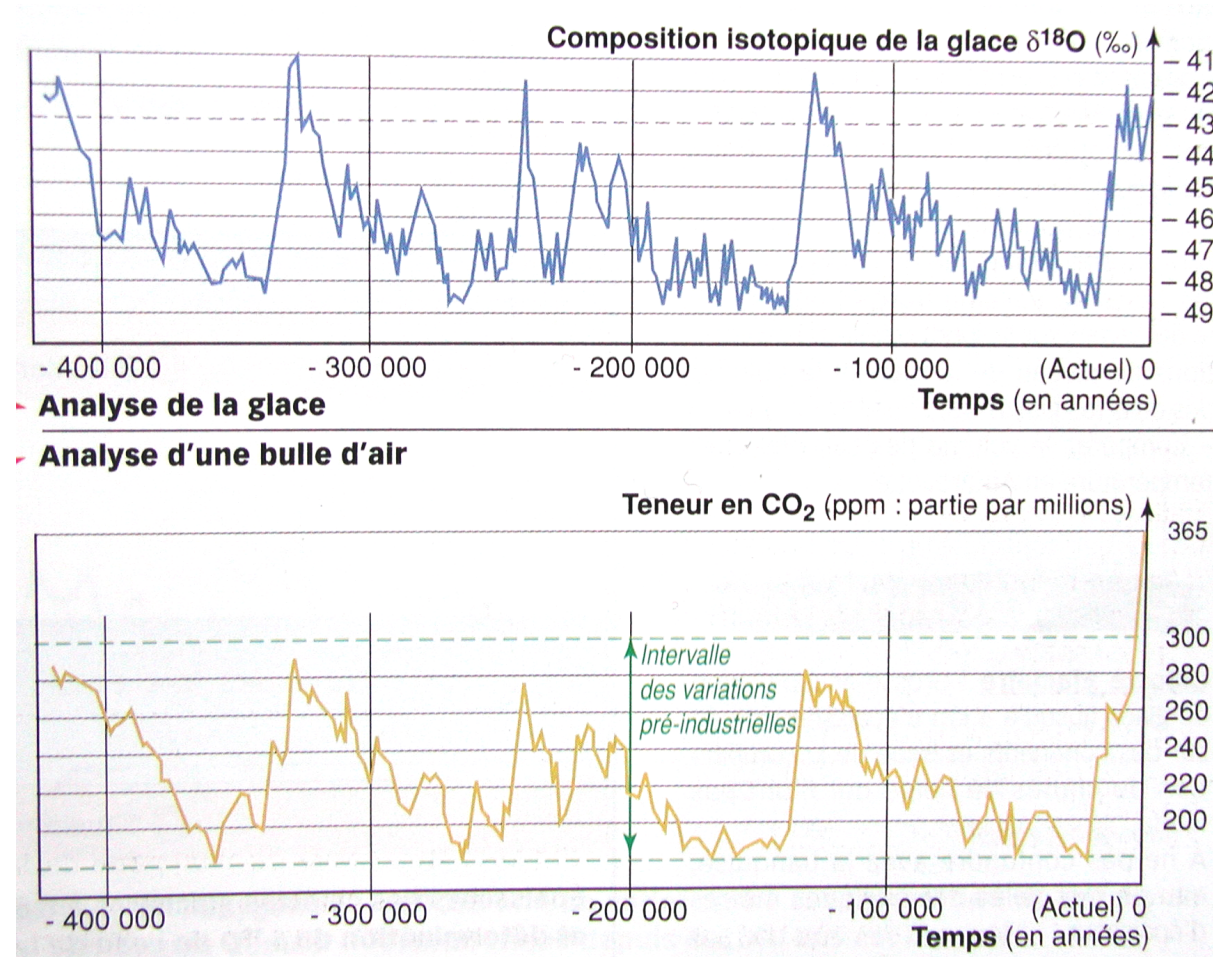


I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

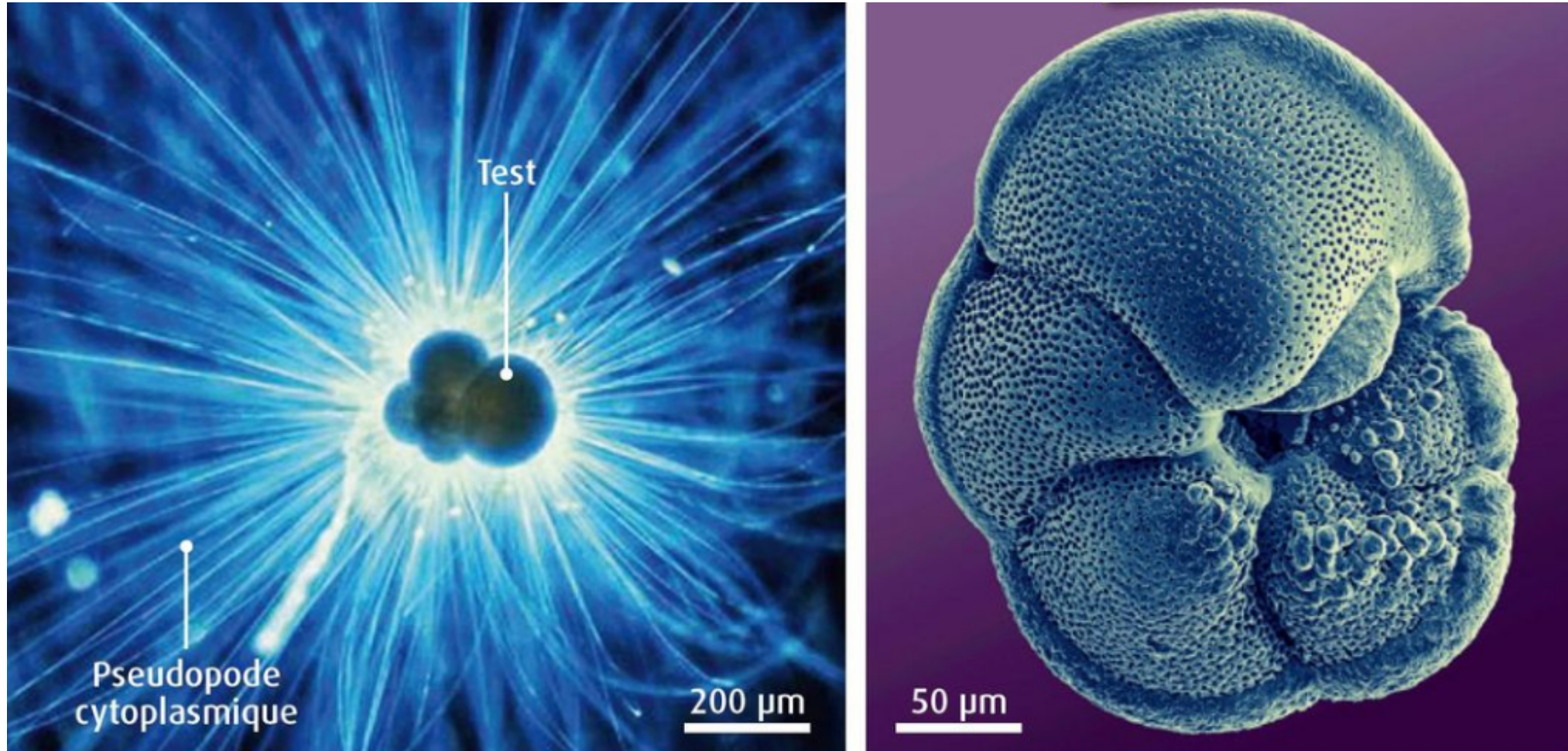


Comparaison des mesures du $\delta^{18}\text{O}$ et de la teneur en CO_2 de la glace

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 1) Les traces continentales des climats froids
 - 2) Les outils isotopiques
 - a) L'utilisation des glaces polaires
 - b) L'utilisation des sédiments océaniques
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - b) L'utilisation des sédiments océaniques



Observation d'un foraminifère entier au MO (à gauche) et juste son test au MEB (droite)

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - b) L'utilisation des sédiments océaniques



Du forage à la carotte sédimentaire...



<https://www.ifremer.fr/L-ocean-pour-tous/Nos-ressources-pedagogiques/Suivez-nos-campagnes/Campagne-Guaymas-Tectonics-and-Biosphere-385-du-programme-IODP-2019/Tour-d-horizon-du-Joides-resolution-et-la-vie-d-une-carotte-de-sediment>

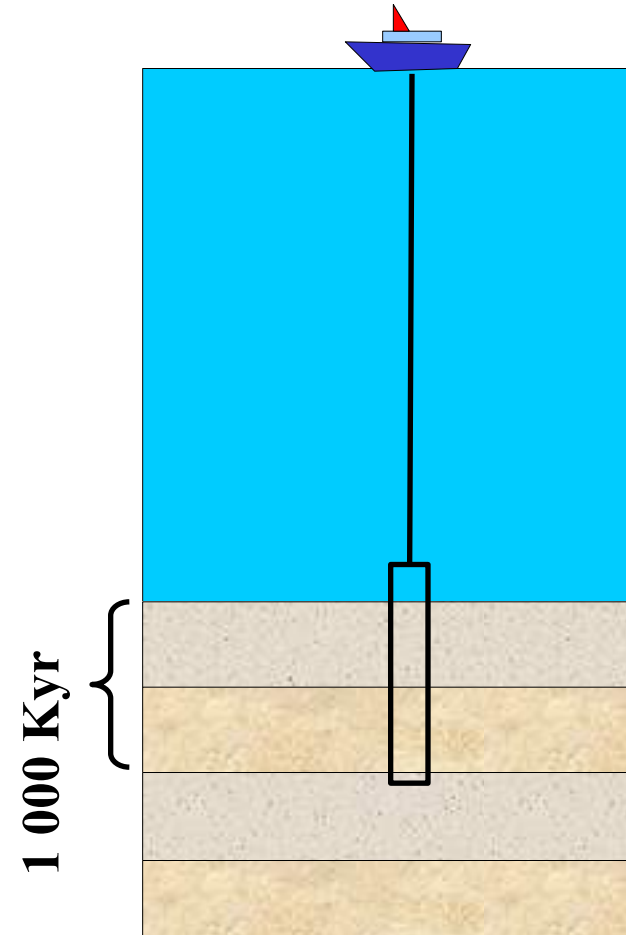
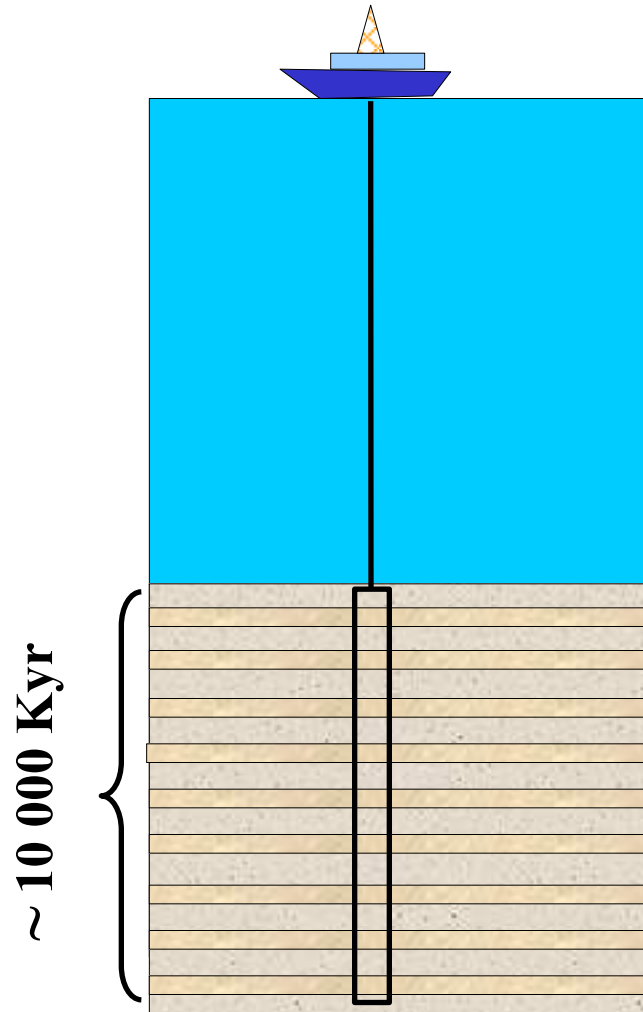
<https://www.mnhn.fr/fr/collections/ensembles-collections/mineralogie-geologie/sediments-carottes-oceaniques>

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

b) L'utilisation des sédiments océaniques



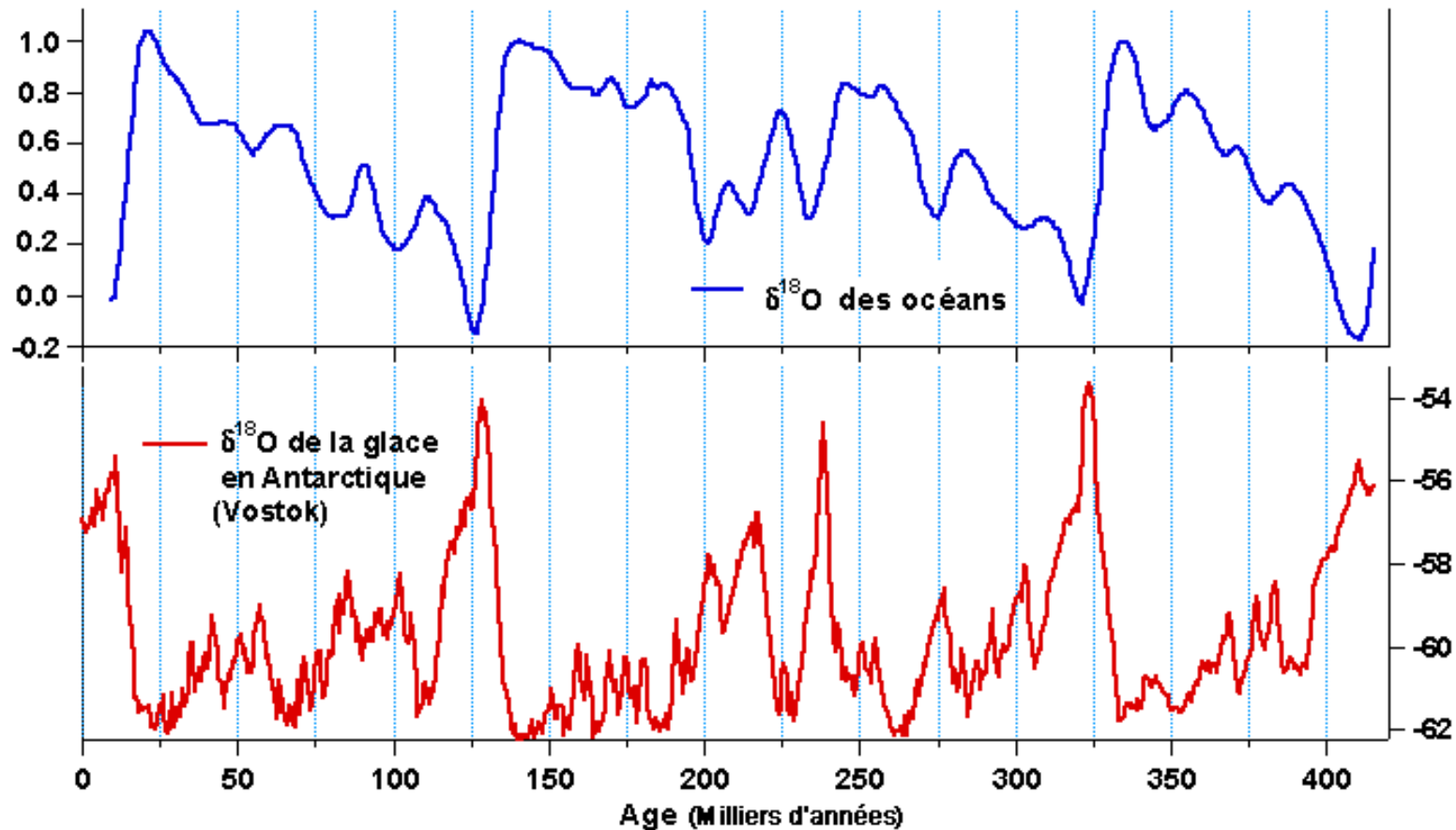
I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

b) L'utilisation des sédiments océaniques

Comparaison des $\delta^{18}\text{O}$ mesures isotopiques des coquilles des microfossiles
issus des sédiments avec les mesures isotopiques dans la glace



Plan du chapitre

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

1) Les traces continentales des climats froids

2) Les outils isotopiques

a) L'utilisation des glaces polaires

b) L'utilisation des sédiments océaniques

c) Les pollens et spores de végétaux

B) Les variations cycliques du climat

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

B) Une hypothèse orogénique

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

B) ...et une cause de grande profondeur

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

B) Une origine mixte

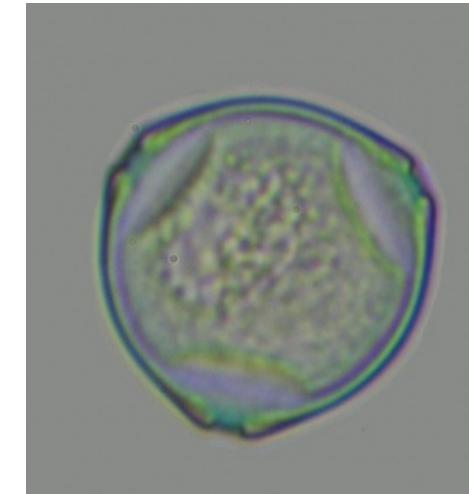
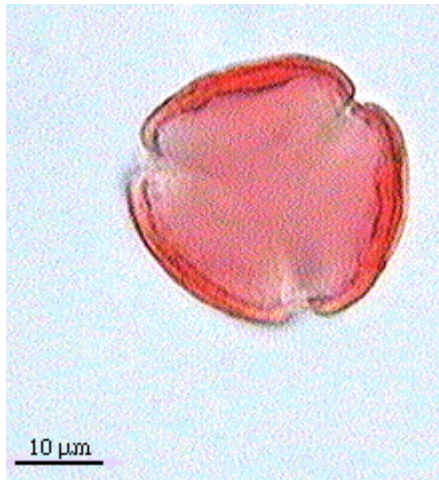
- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - c) Les pollens et spores de végétaux



Pollinisation

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - c) Les pollens et spores de végétaux

La paroi des grains de pollen des plantes à fleur (ou des spores des fougères) est très résistante, et peut être fossilisée dans des sédiments.



I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

2) Les outils isotopiques

c) Les pollens et spores de végétaux

Le marais de Grande Brière (Loire-Atlantique) : des dépôts actuels de tourbe, lieu propice à la conservation des grains de pollens et des spores des végétaux vivant à proximité.



Brière © P. Baly

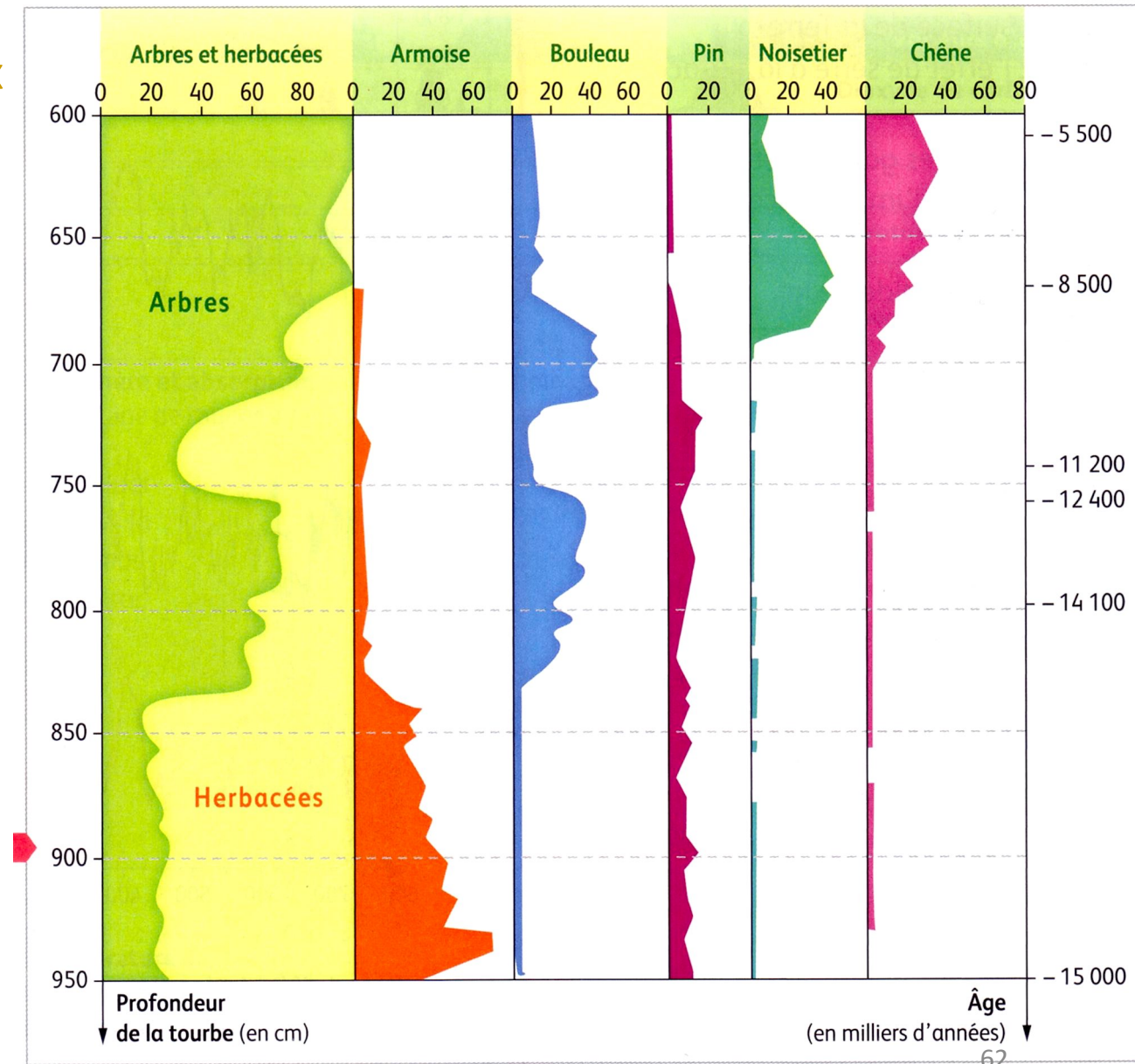
Tourbe =

Dépôt formé par
l'accumulation de débris
végétaux non dégradés du
fait des conditions peu
oxygénées du milieu de
dépôt

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - c) Les pollens et spores de végétaux

Ce diagramme représente l'abondance relative des pollens de diverses espèces dans la tourbe en fonction de la profondeur.

Diagramme pollinique (site de la Cousteix, Auvergne)



- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - c) Les pollens et spores de végétaux

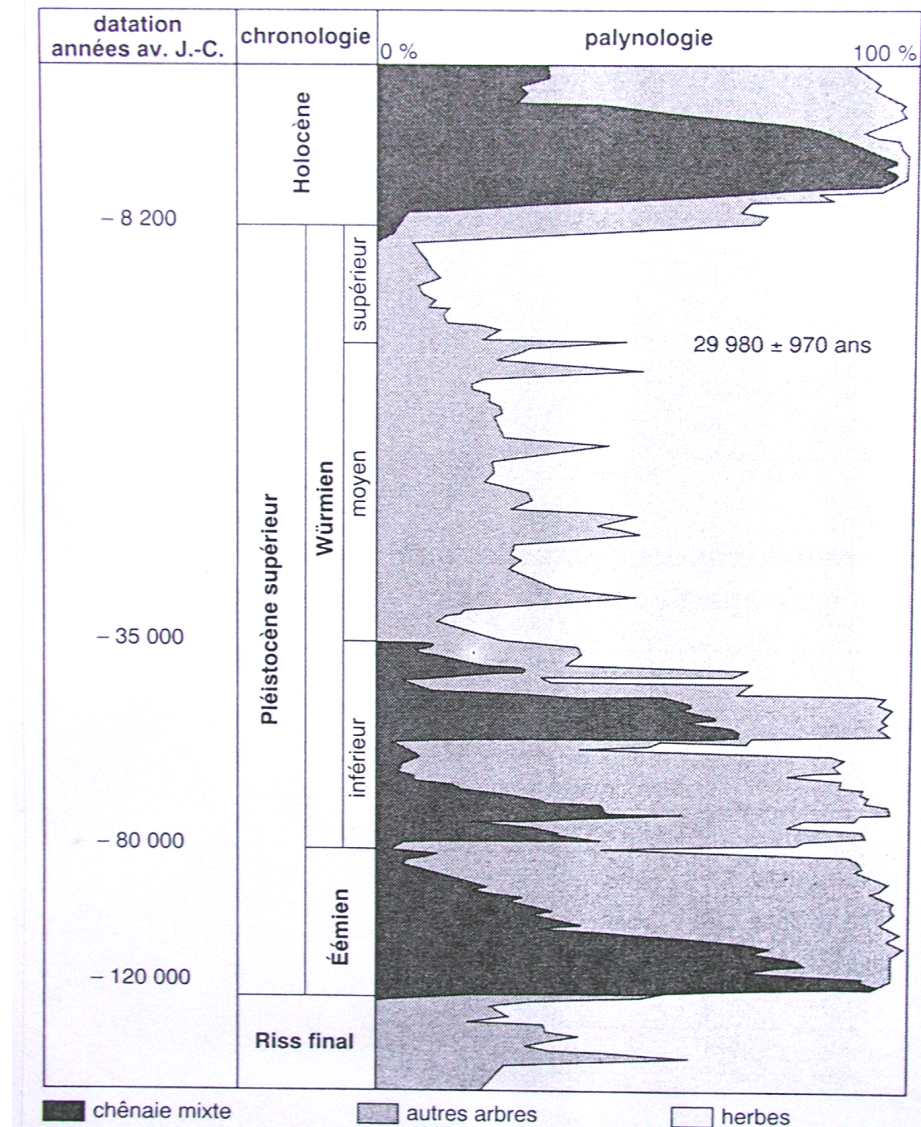


Diagramme pollinique de
la Grande Pile

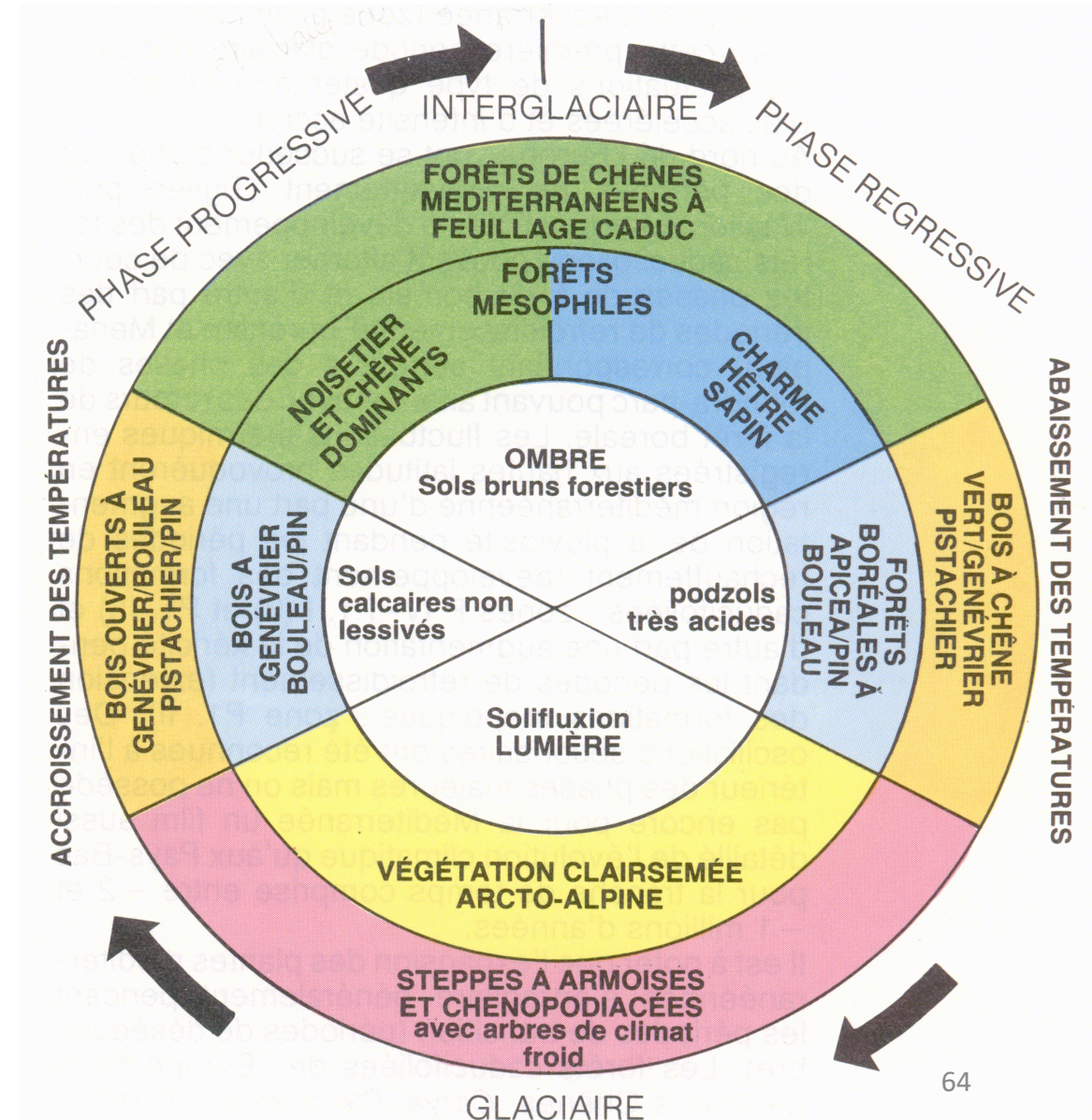
(Haute-Saône, dans le
massif des Vosges)

- 1) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- A) Les outils d'étude des climats anciens
- 2) Les outils isotopiques
- c) Les pollens et spores de végétaux

Ce diagramme représente l'abondance relative des pollens de diverses espèces dans la tourbe en fonction de la profondeur.

Cycle bioclimatique

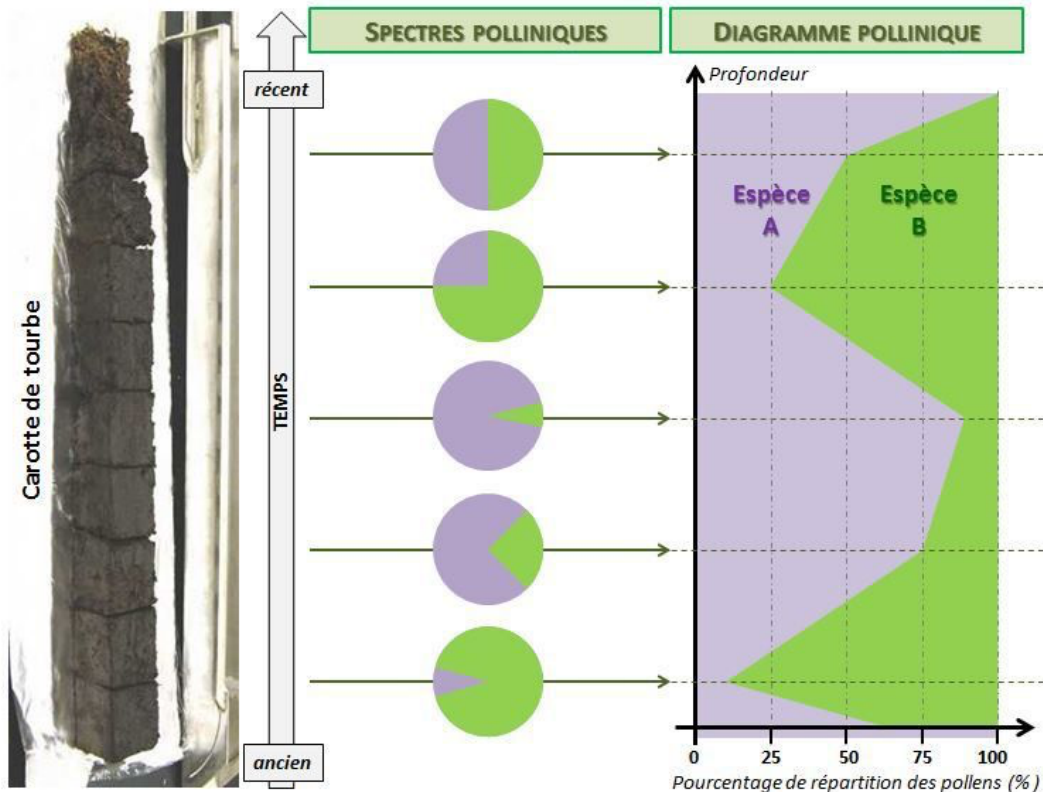
T. van der Hammen, T.A. Wijmstra & W.H. Zagwijn 1971



- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - 2) Les outils isotopiques
 - c) Les pollens et spores de végétaux

Le principe d'actualisme (ou uniformitarisme) : les lois qui dirigent les phénomènes biologiques et géologiques actuels sont les mêmes que celles du passé.

Le présent est la clé du passé



Espèce A : Armoise (herbacée ou arbuste)

Espèce B : Chêne Méditerranée (arbre)

Plan du chapitre

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

A) Les outils d'étude des climats anciens

B) Les variations cycliques du climat

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

B) Une hypothèse orogénique

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

B) ...et une cause de grande profondeur

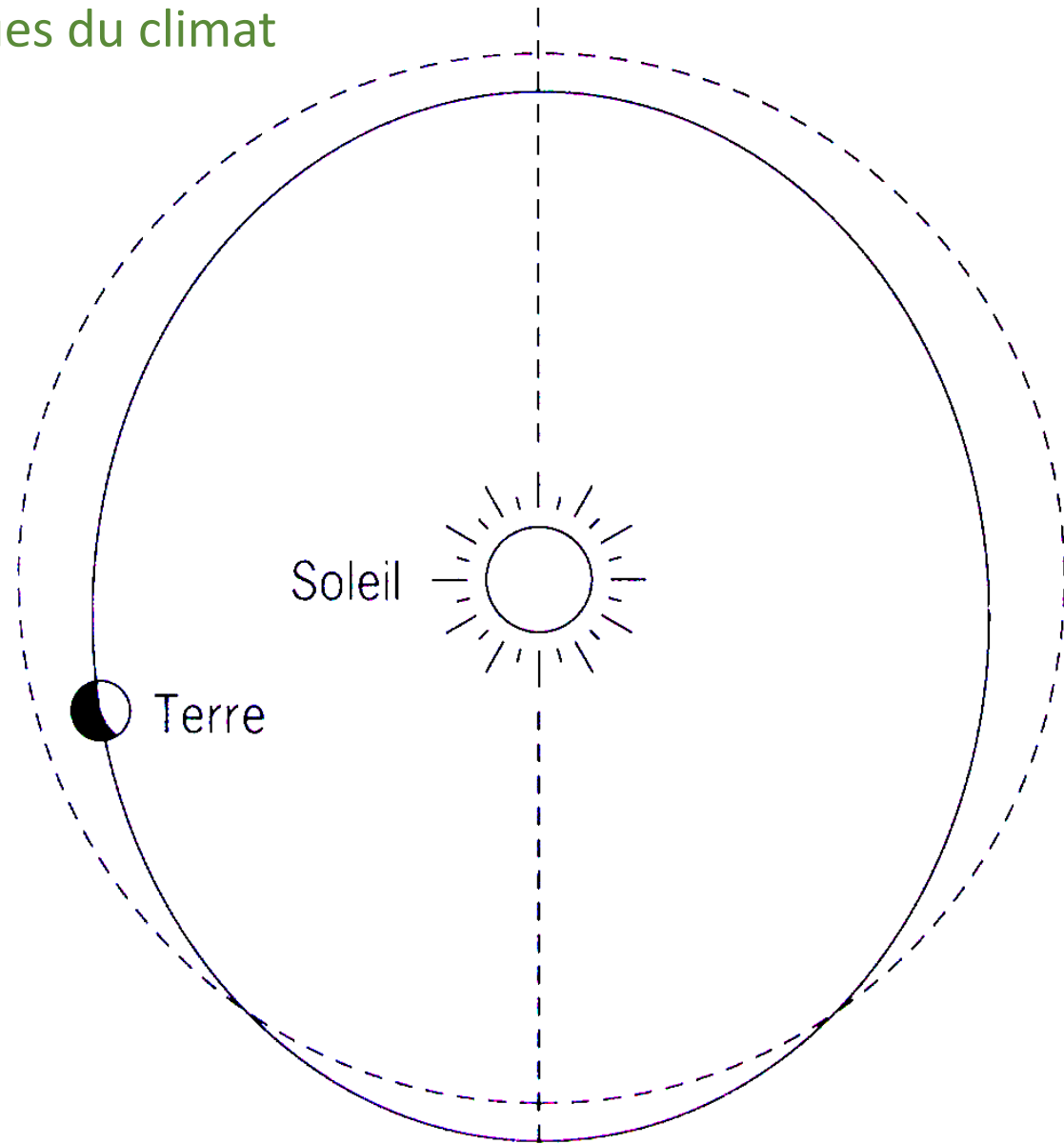
IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

B) Une origine mixte

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat

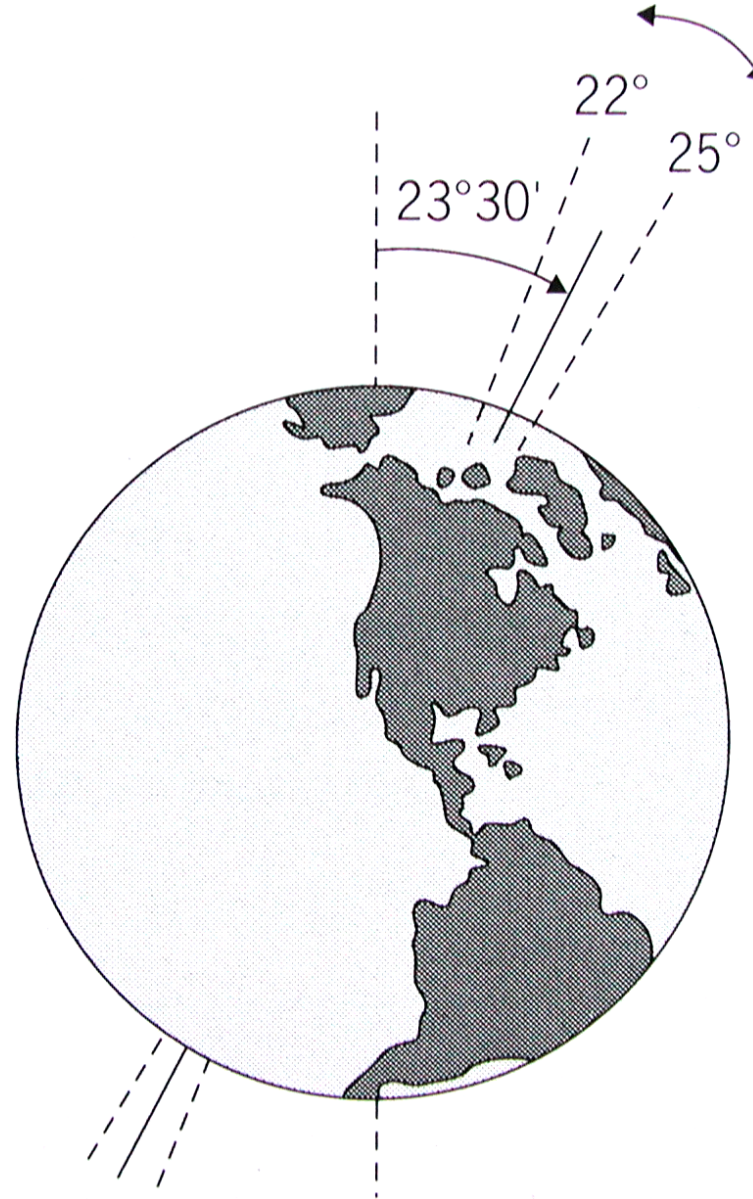


Période de 100 000 et 400 000 ans

Variations de l'excentricité

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- B) Les variations cycliques du climat

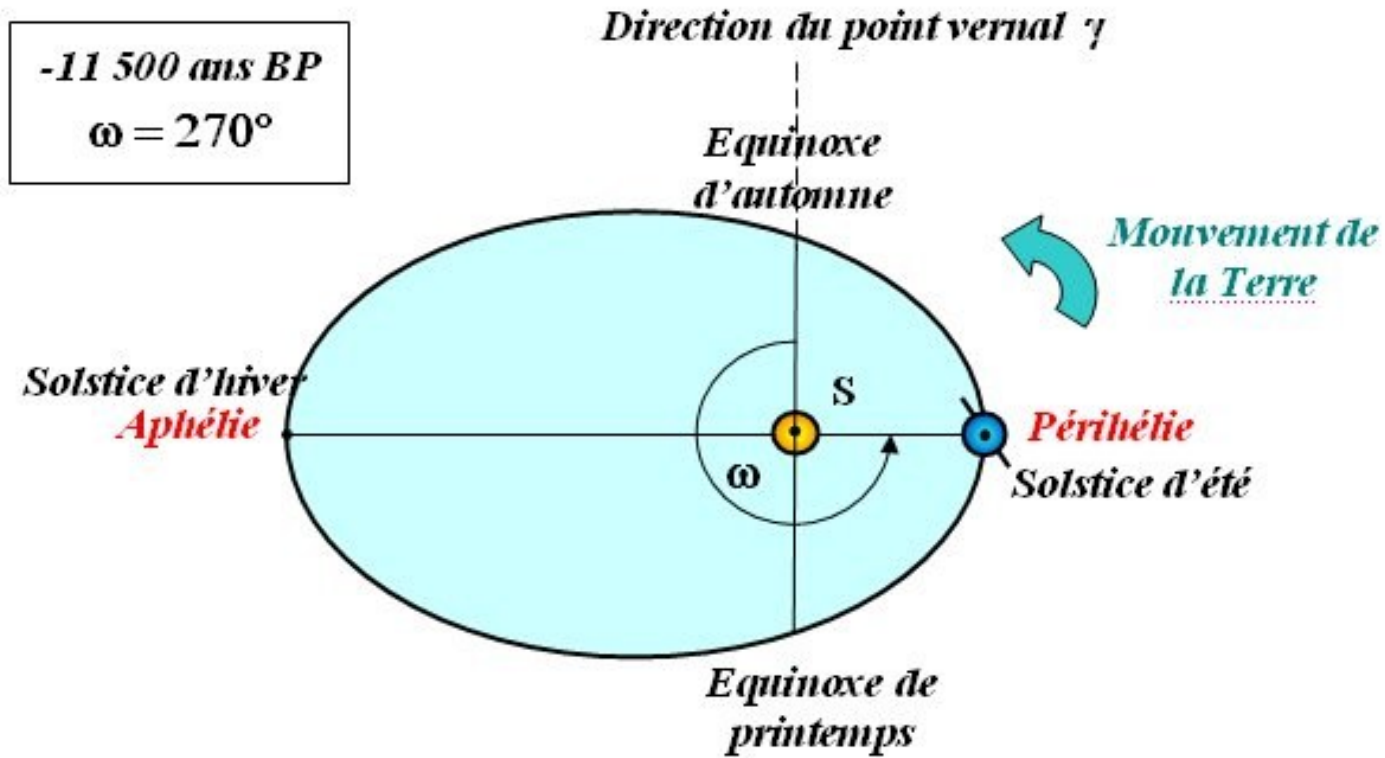
Variation de l'obliquité



Période de 41 000 ans

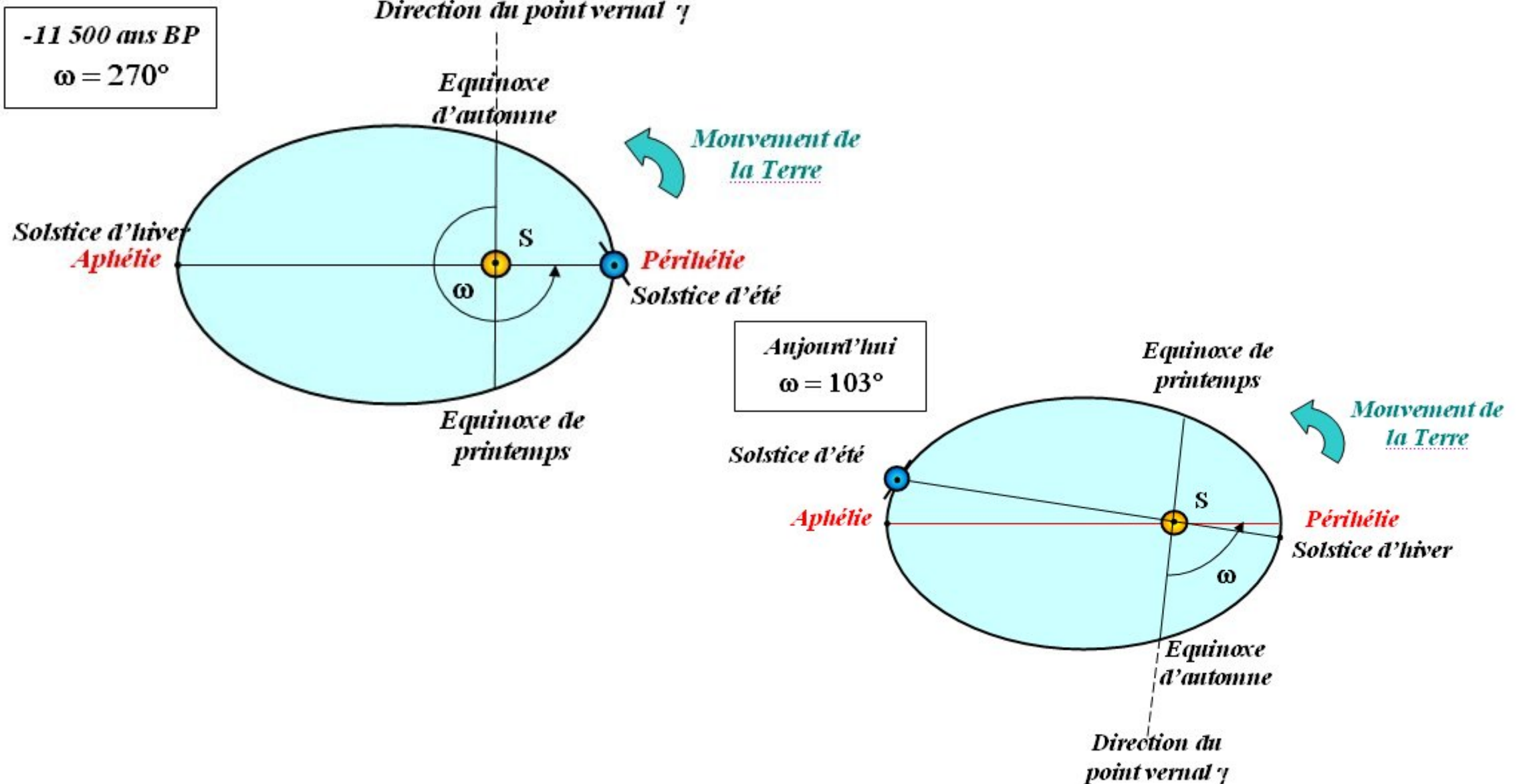
I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat

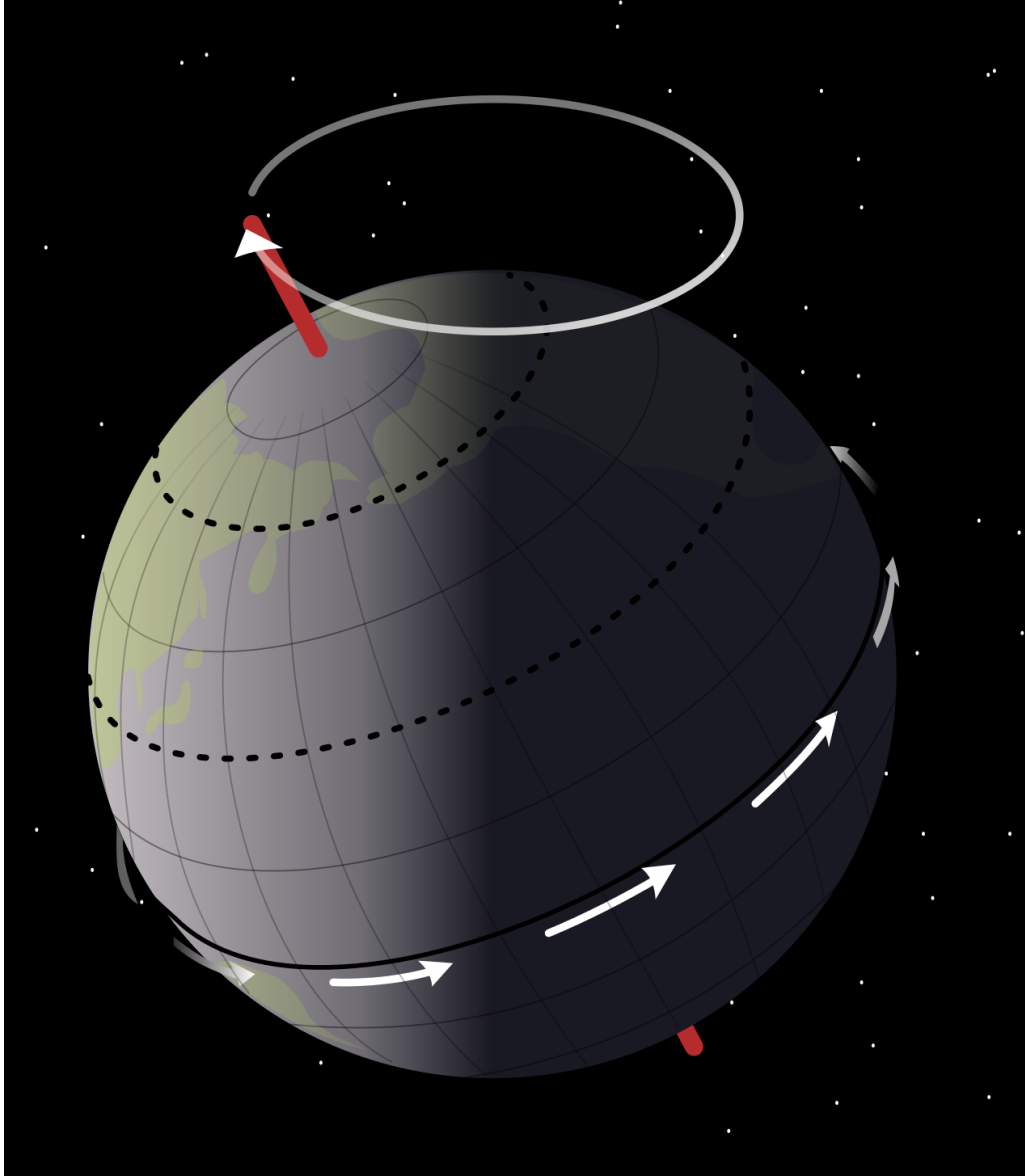


I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat



- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- B) Les variations cycliques du climat



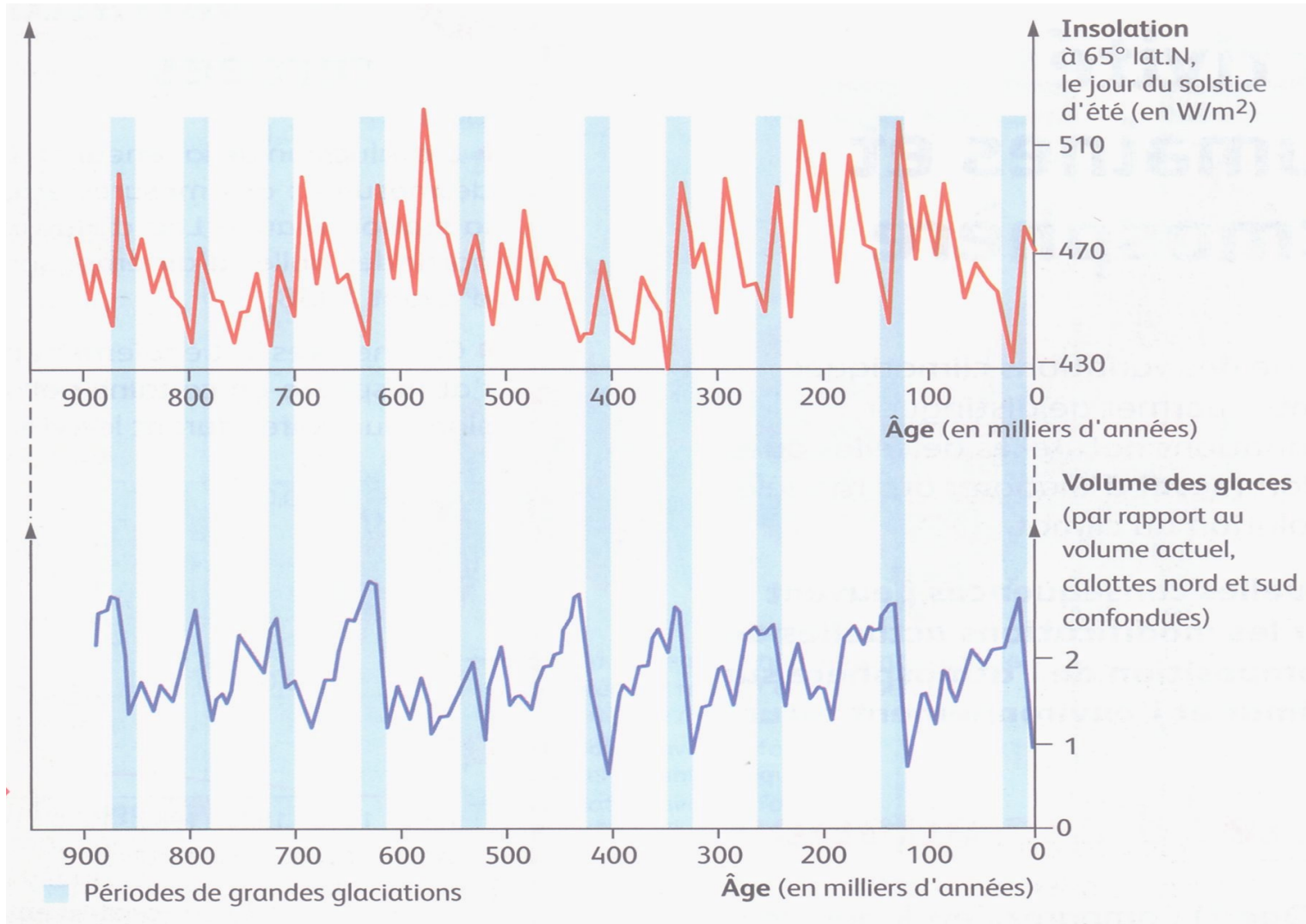
https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9cession_des_%C3%A9quinoxes#/media/Fichier:Earth_precession.svg



I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat

Comparaison des variations des paramètres orbitaux et des variations des volumes de glaces polaires



L'insolation est calculée à partir de la position de la Terre (donc de ses paramètres orbitaux) et le volume des glaces polaires est déduit des études isotopiques des glaces.

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat

Rappel 1 : l'albédo

(déf.): rapport entre l'énergie reçue et l'énergie réfléchie par une surface, pour une longueur d'onde donnée.

Exemples :

Surface de la mer	0,05 à 0,15	(5-15 %)
Neige fraîche	0,75 à 0,95	(75-95 %)
Forêt de Conifères	0,05 à 0,15	(5-15 %)
Albédo moyen de la Terre	0,40	(40%)

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
- B) Les variations cycliques du climat

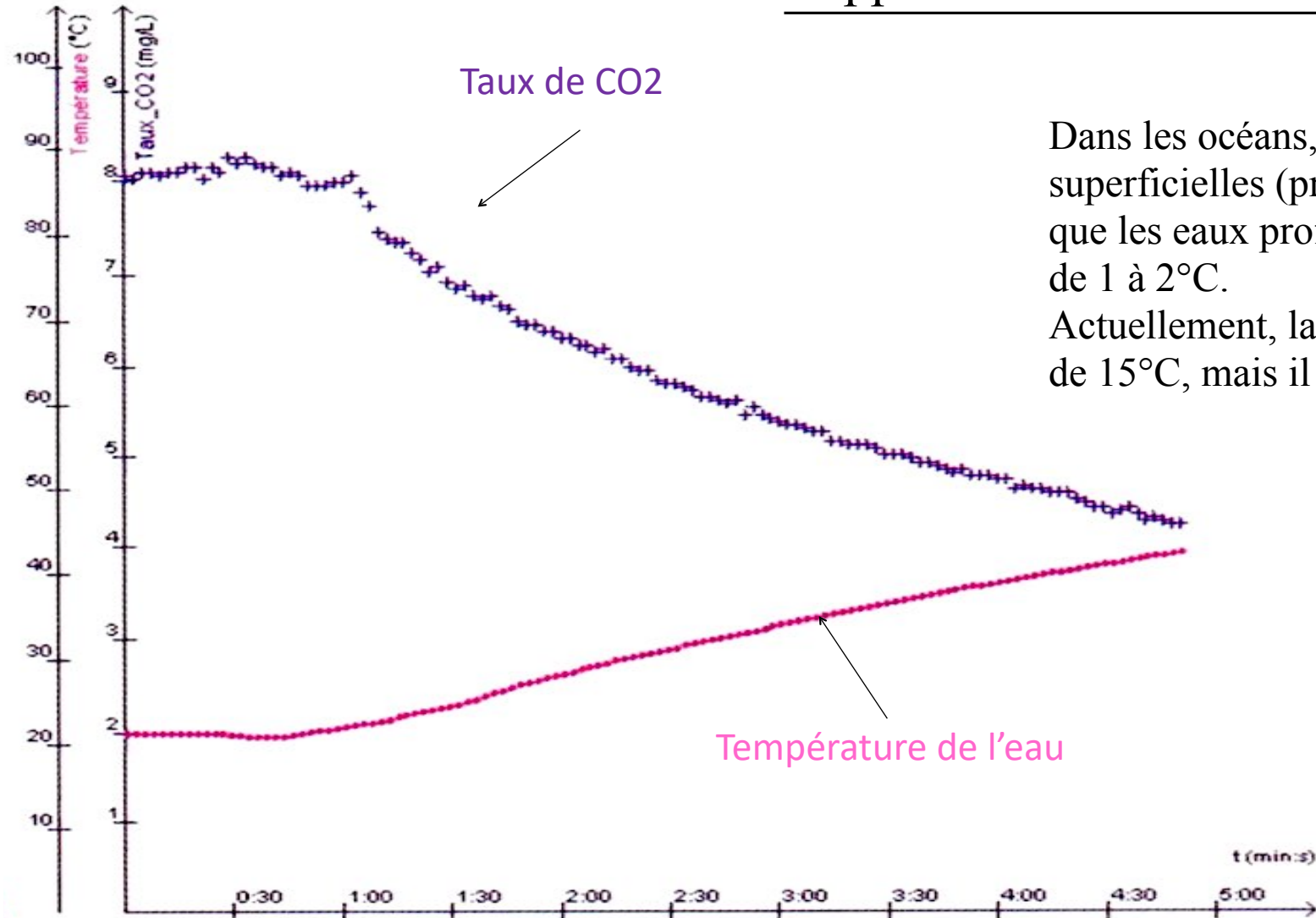


La neige est rouge en Antarctique à cause de la présence d'une algue, *Chlamydomonas nivalis*.
Au mois de février 2020, l'Antarctique a vécu un pic de chaleur historique, il a fait **18,4°C** alors que d'habitude, les températures sont comprises entre **-28°C** et **-3°C**.

I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans

B) Les variations cycliques du climat

Rappel 2 : solubilité du CO₂ (et de tout gaz) et température



Dans les océans, la température moyenne des eaux superficielles (profondeur < 1000 m) dépend du climat, alors que les eaux profondes ont une température constante autour de 1 à 2°C.

Actuellement, la température moyenne des eaux de surface est de 15°C, mais il y a 20 000 ans, elle était de 10°C.

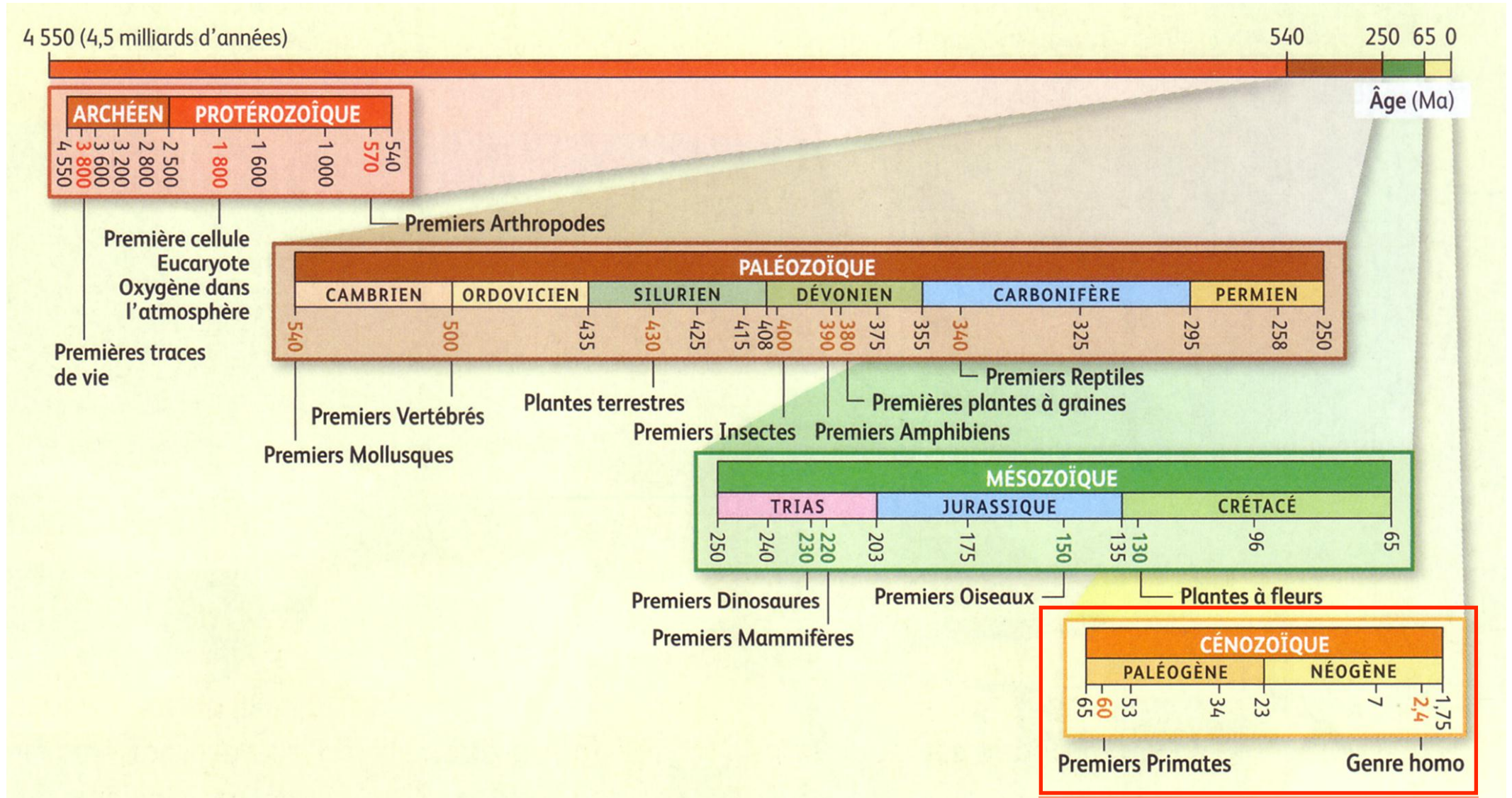
Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

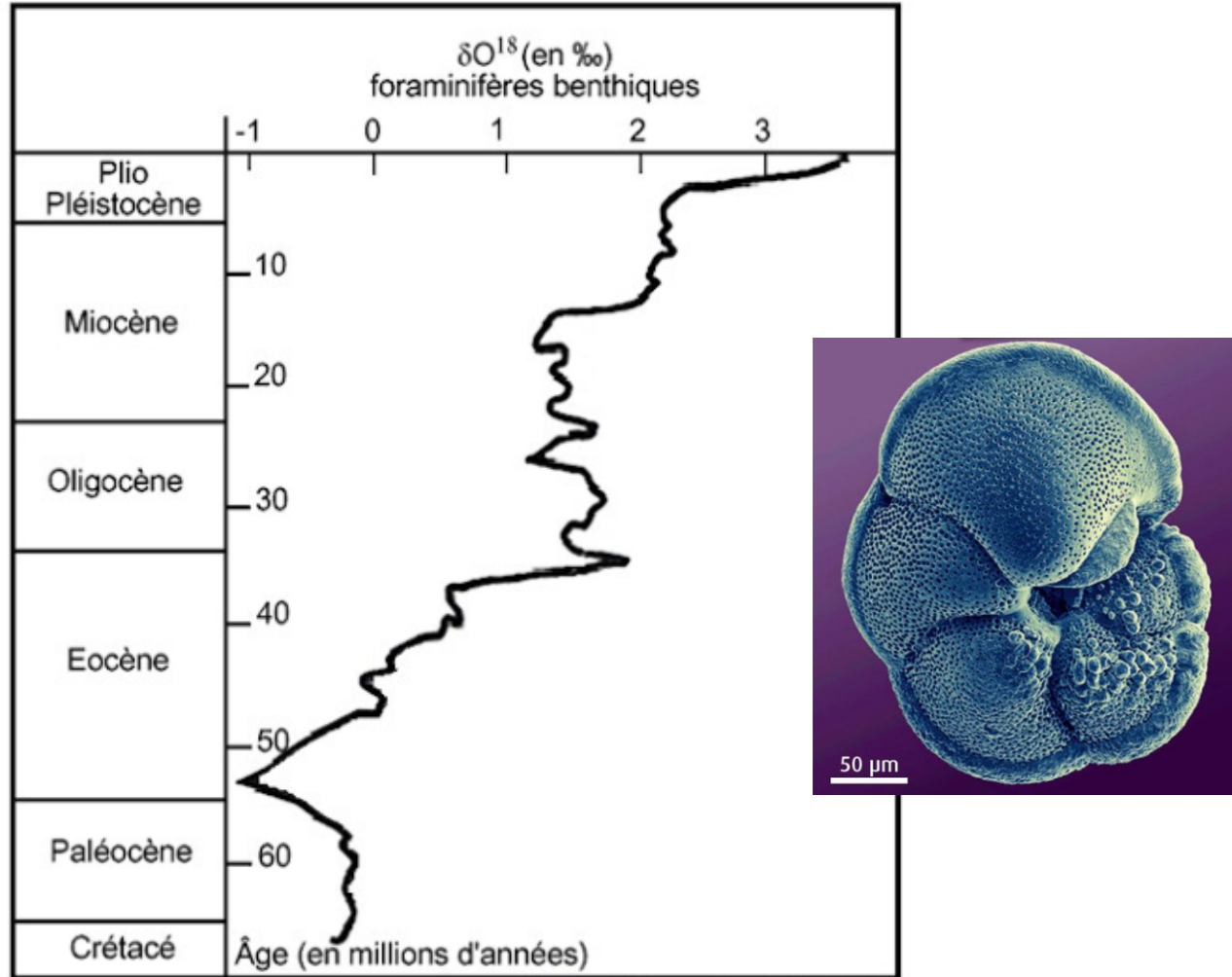
1) Des mesures isotopiques



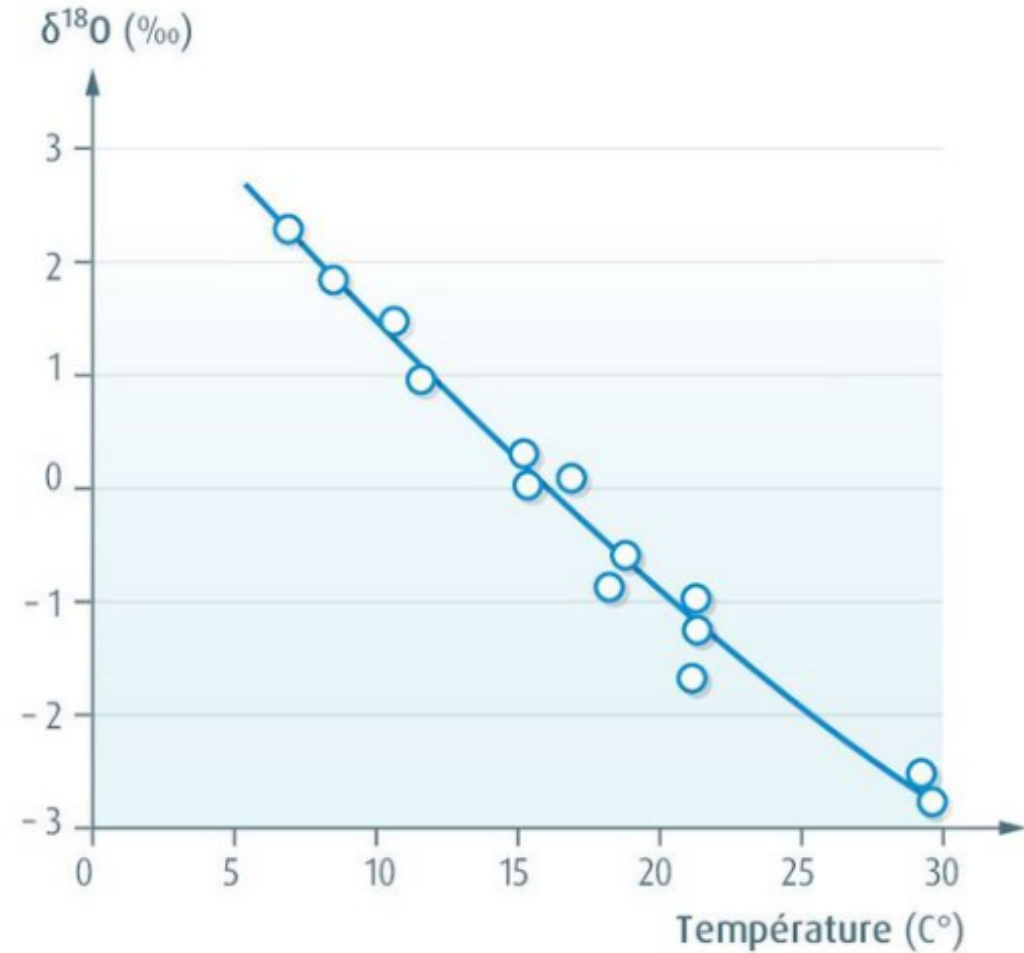
II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

1) Des mesures isotopiques



Variations du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques depuis 65 Ma



D'après Manuel de Terminale Spécialité SVT, Belin, 2020, page 297

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - 2) Des indices biologiques
 - a) L'indice stomatique
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

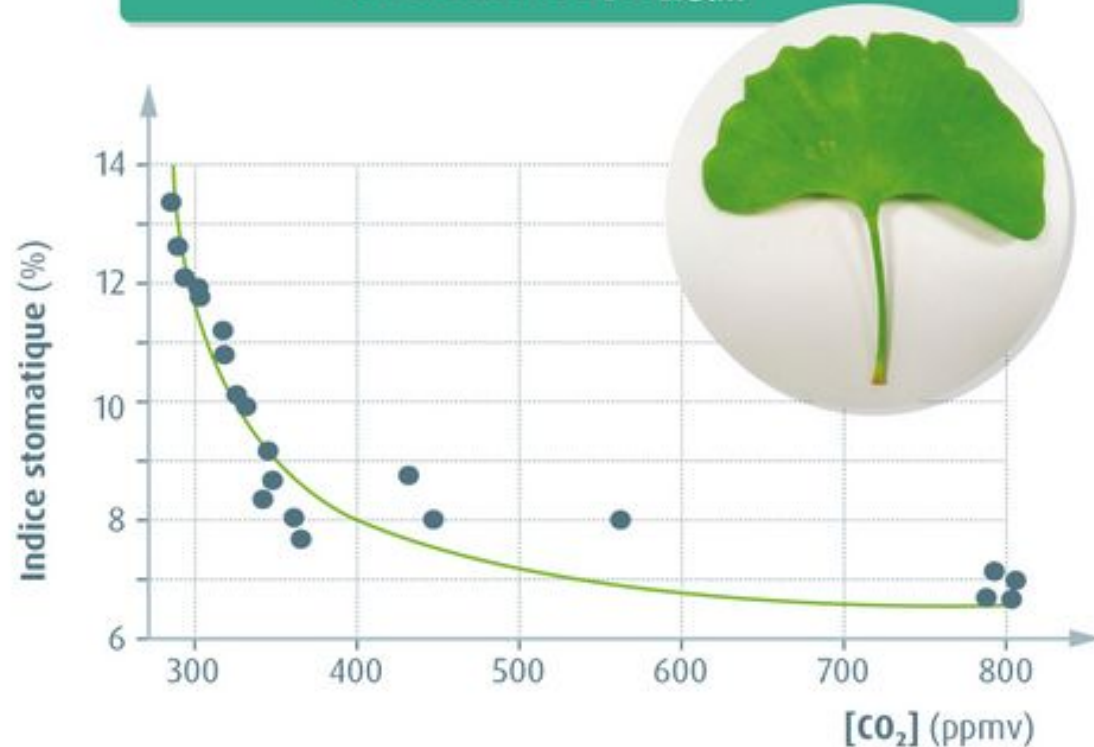
2) Des indices biologiques

a) L'indice stomatique

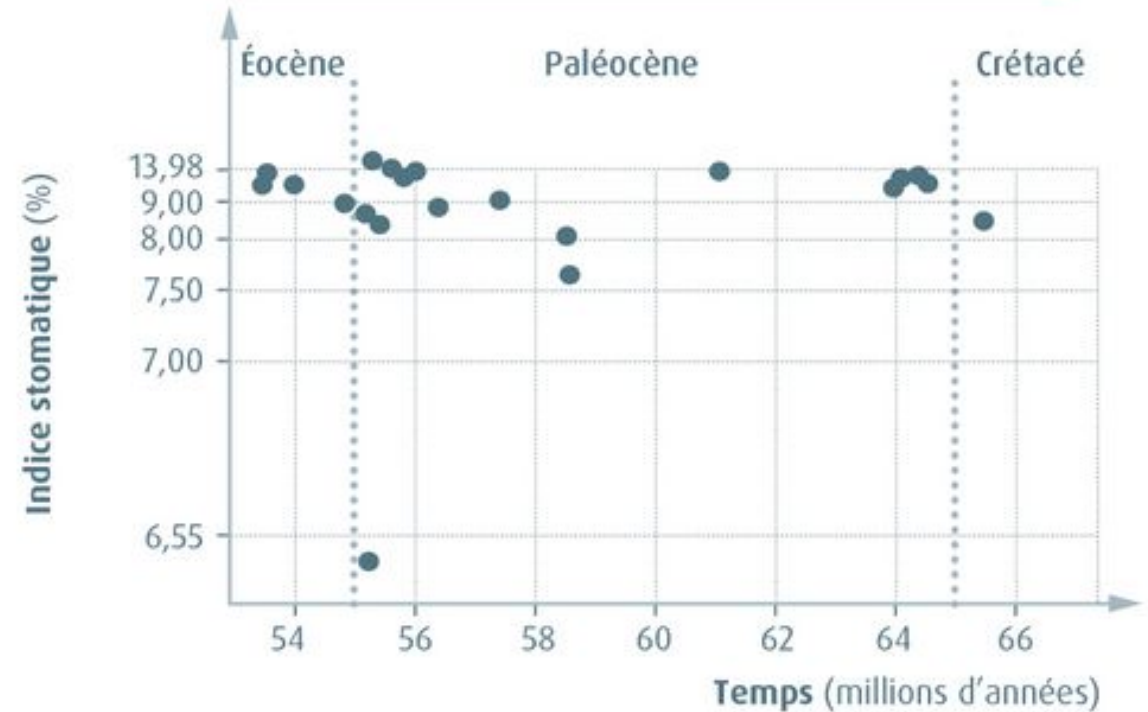


Mesure de l'indice stomatique

Indice stomatique de feuilles de ginkgo actuel
en fonction de $[CO_2]_{atm}$



Indice stomatique mesuré sur des feuilles
fossiles de ginkgo

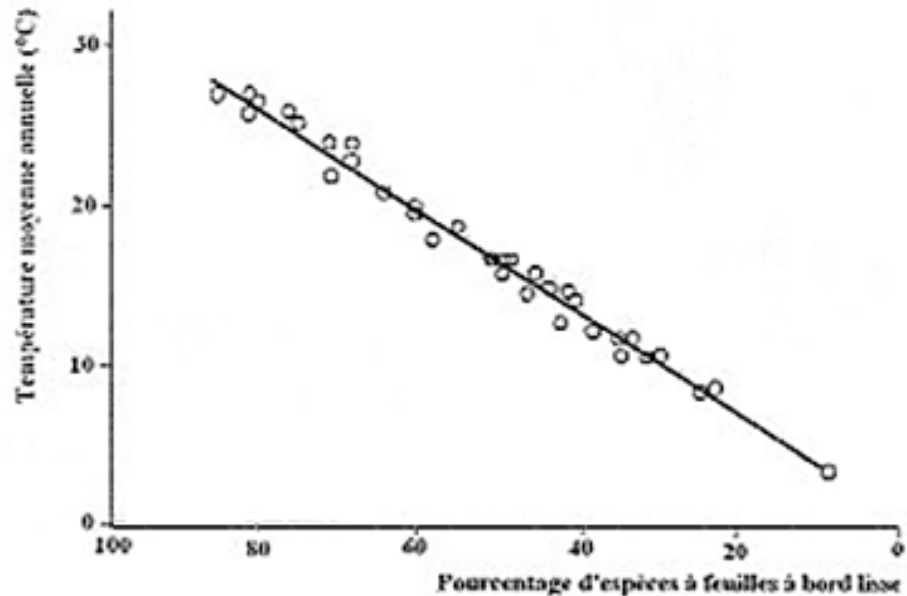
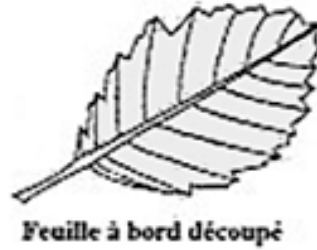
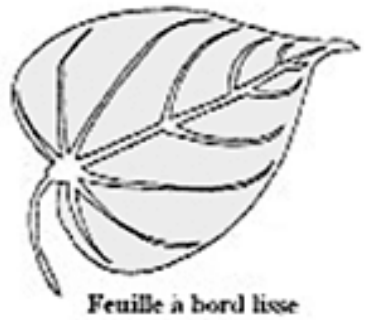


II) La grande variation climatique du Cénozoïque

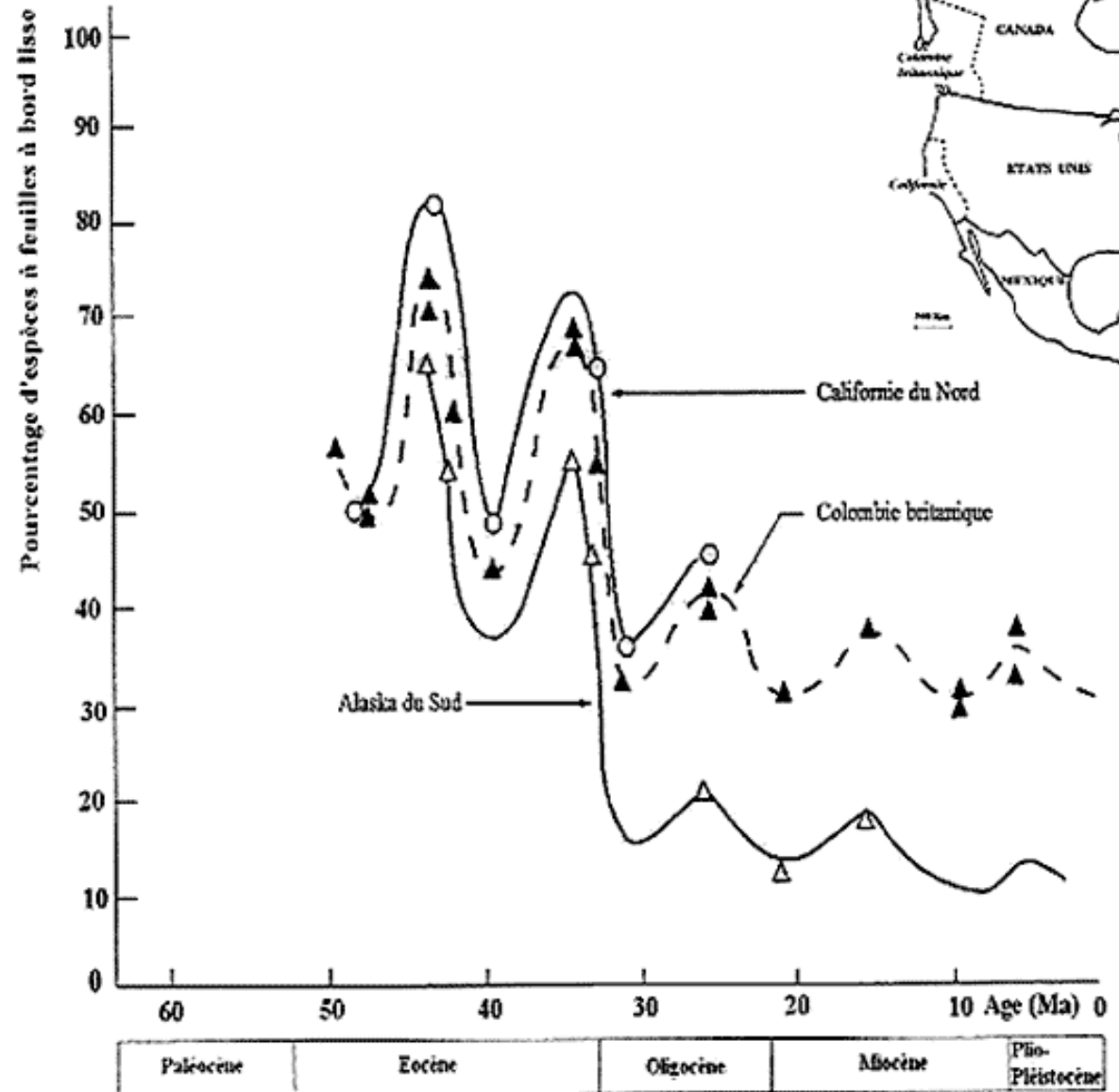
A) Des indices d'un refroidissement généralisé

2) Des indices biologiques

a) L'indice stomatique



La forme des feuilles



Plan du chapitre

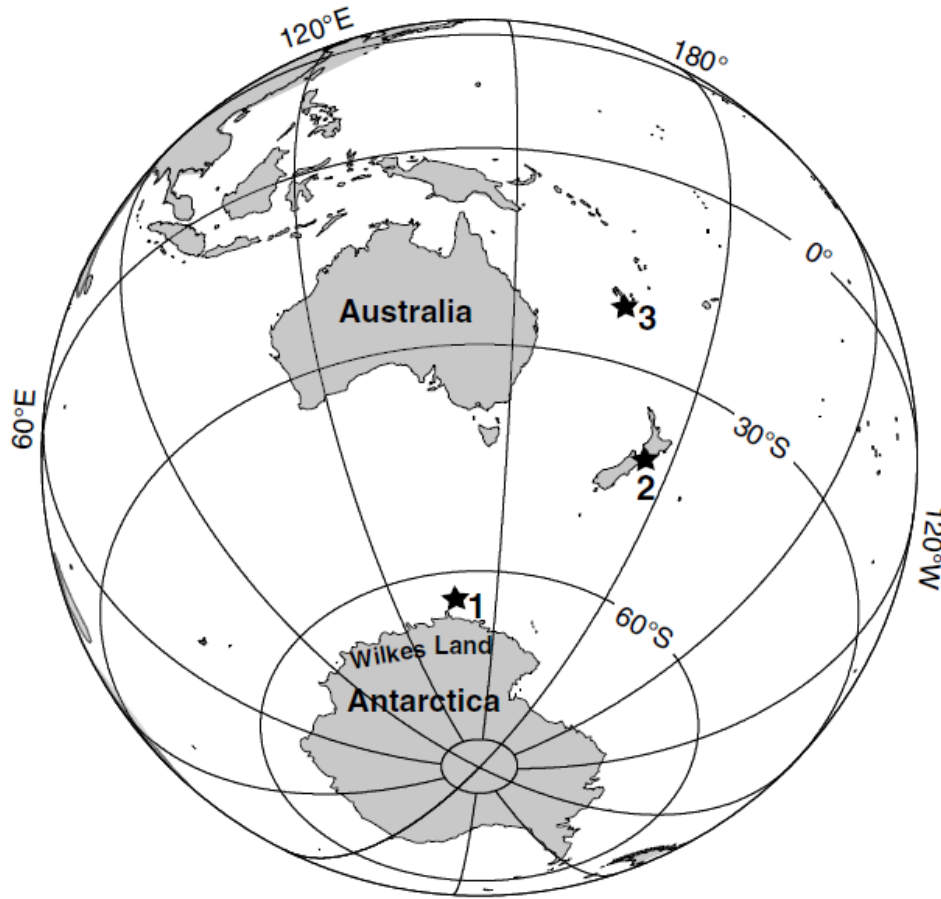
- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - 2) Des indices biologiques
 - a) L'indice stomatique
 - b) Encore des grains de pollen
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

2) Des indices biologiques

b) Encore des grains de pollen



Étude des pollens ou spores (= *sporomorphes*) dans le forage IODP 1356 réalisé à proximité des côtes Antarctique, dans des sédiments de l'Éocène inférieur.

Situation géographique actuelle
1 : site de forage IODP 1356

D'après Early to Middle Eocene vegetation dynamics at the Wilkes Land Margin (Antarctica), Review of Palaeobotany and Palynology 197 (2013) 119–142

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

2) Des indices biologiques

b) Encore des grains de pollen

Sporomorphes abondantes dans ce niveau sédimentaire du forage IODP 1356 :

Pollens d'Aracées, de Baobabs, spores de Cyatheaes (fougères arborescentes),...



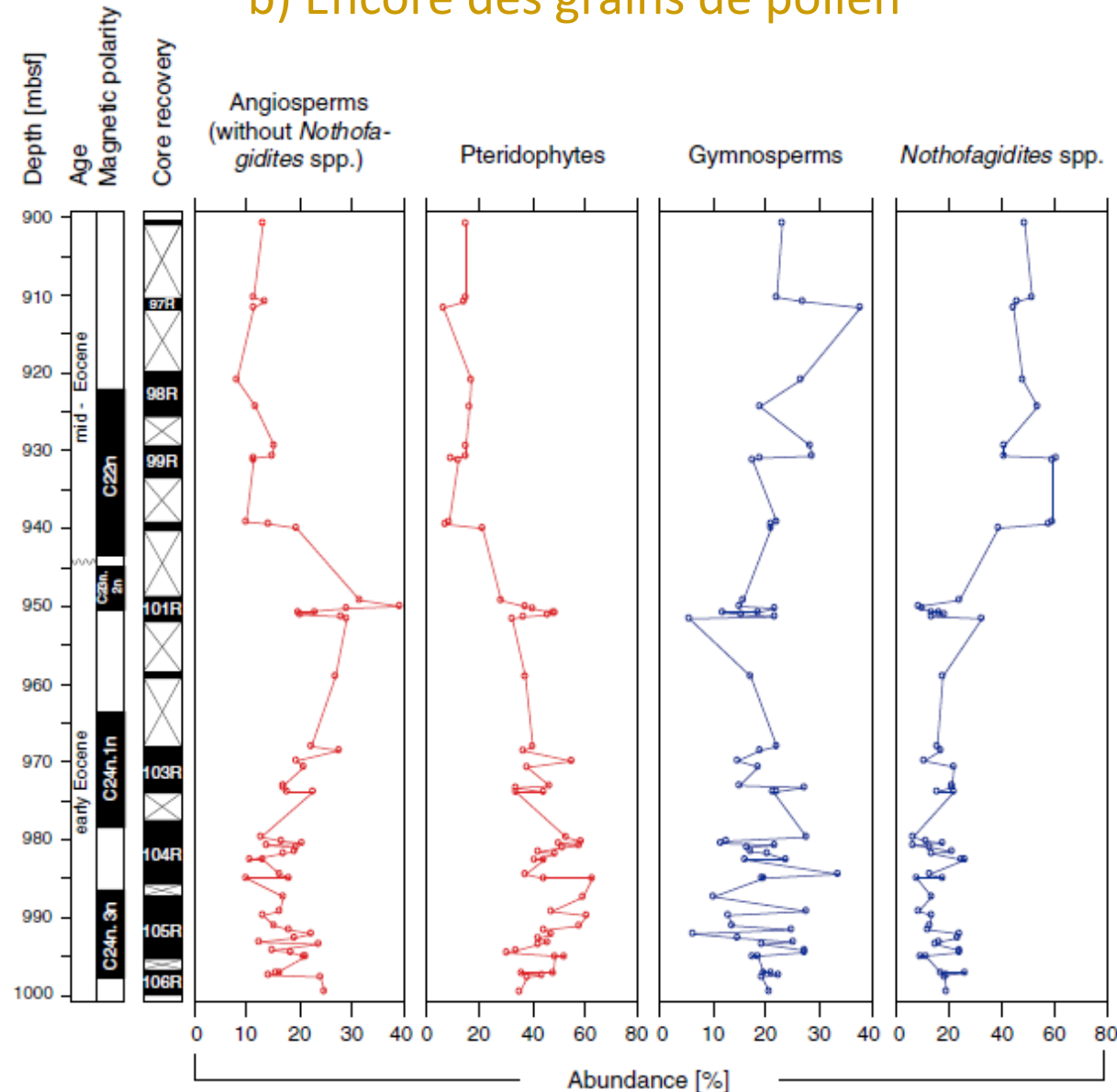
Entre 54 et 48 Ma, pendant la période la plus chaude de ces derniers 65 Ma, une forêt poussait sur la côte Antarctique...de type **subtropical** malgré l'absence de lumière une grande partie de l'année (~2 mois), la température moyenne de l'hiver ne descendait pas en-dessous de 11°C...

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

2) Des indices biologiques

b) Encore des grains de pollen



Extrait des résultats....

D'après Early to Middle Eocene vegetation dynamics at the Wilkes Land Margin (Antarctica), Review of Palaeobotany and Palynology 197 (2013) 119–142

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

A) Des indices d'un refroidissement généralisé

2) Des indices biologiques

b) Encore des grains de pollen

Paleoclimatic estimates derived from the early and mid-Eocene **sporomorph** assemblages from IODP Site U1356

Climate parameter	Early Eocene (Site U1356)
MAT	$16 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
MWT	$11 \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
MST	$21 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
MAP	$132 \pm 55 \text{ cm/yr}$

MAT : Mean annual temperature ; MWT : Mean winter temperature ,
MST : Mean summer temperature ; MAP : Mean annual precipitation.

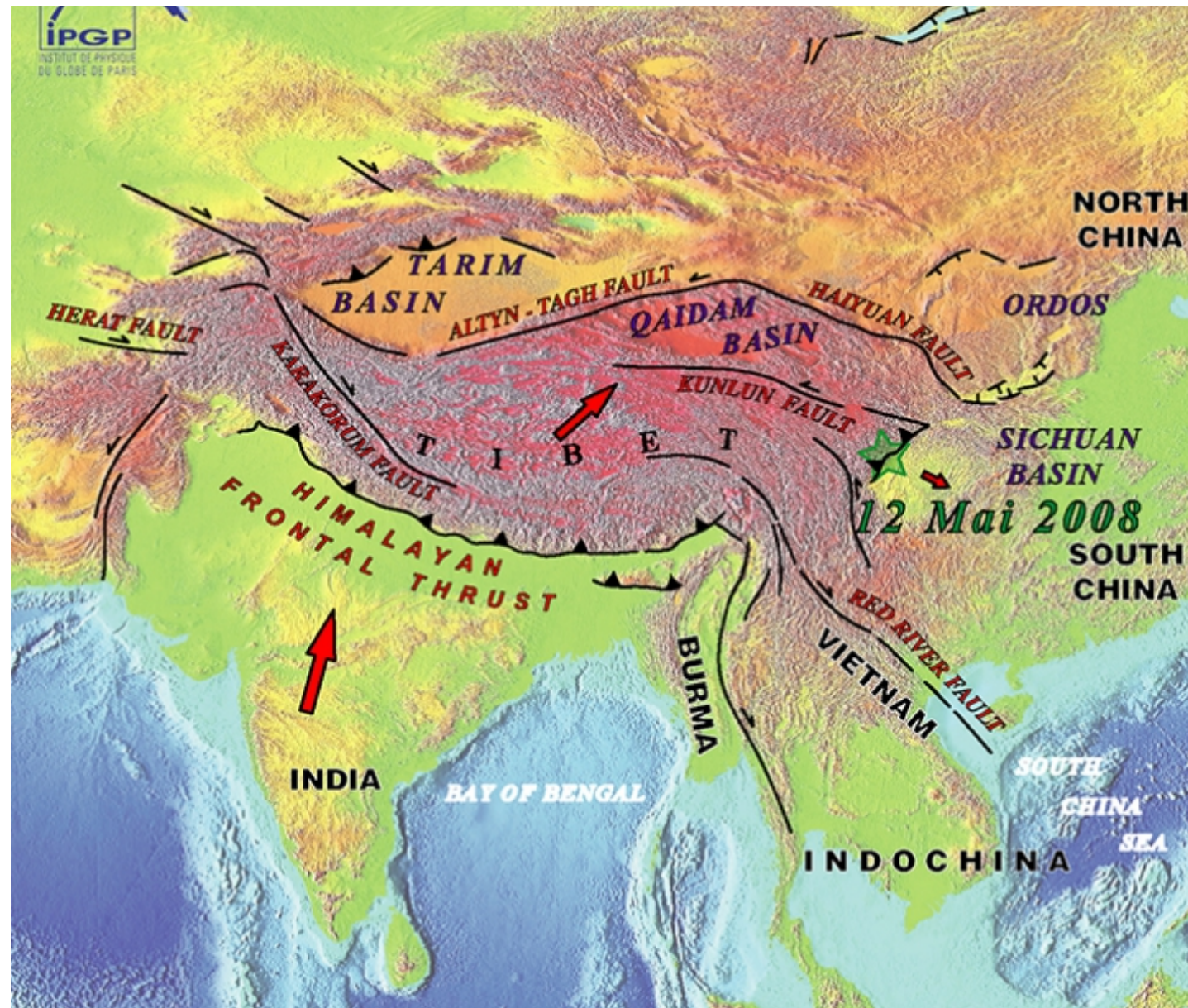
Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - 2) Des indices biologiques
 - B) Une hypothèse orogénique
 - 1) L'édification d'un relief
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

B) Une hypothèse orogénique

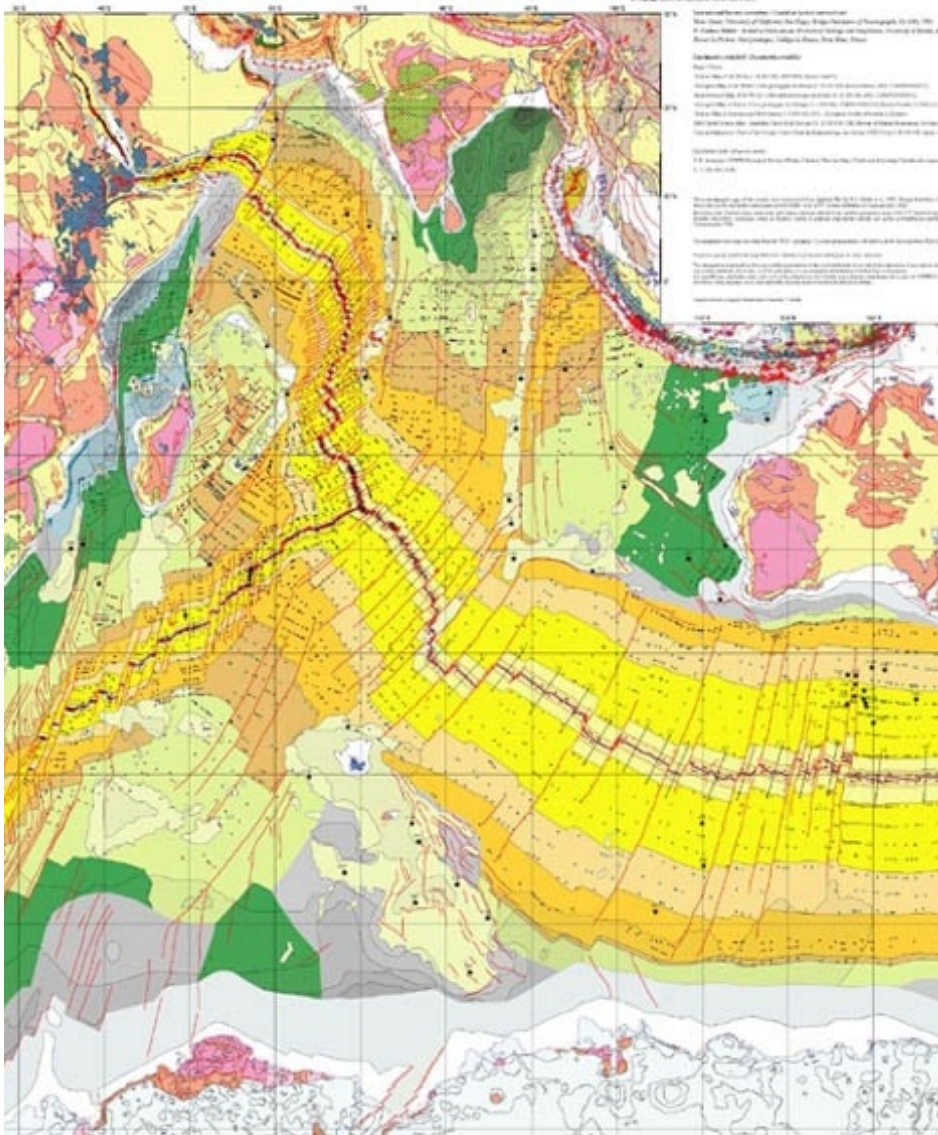
1) L'édification d'un relief



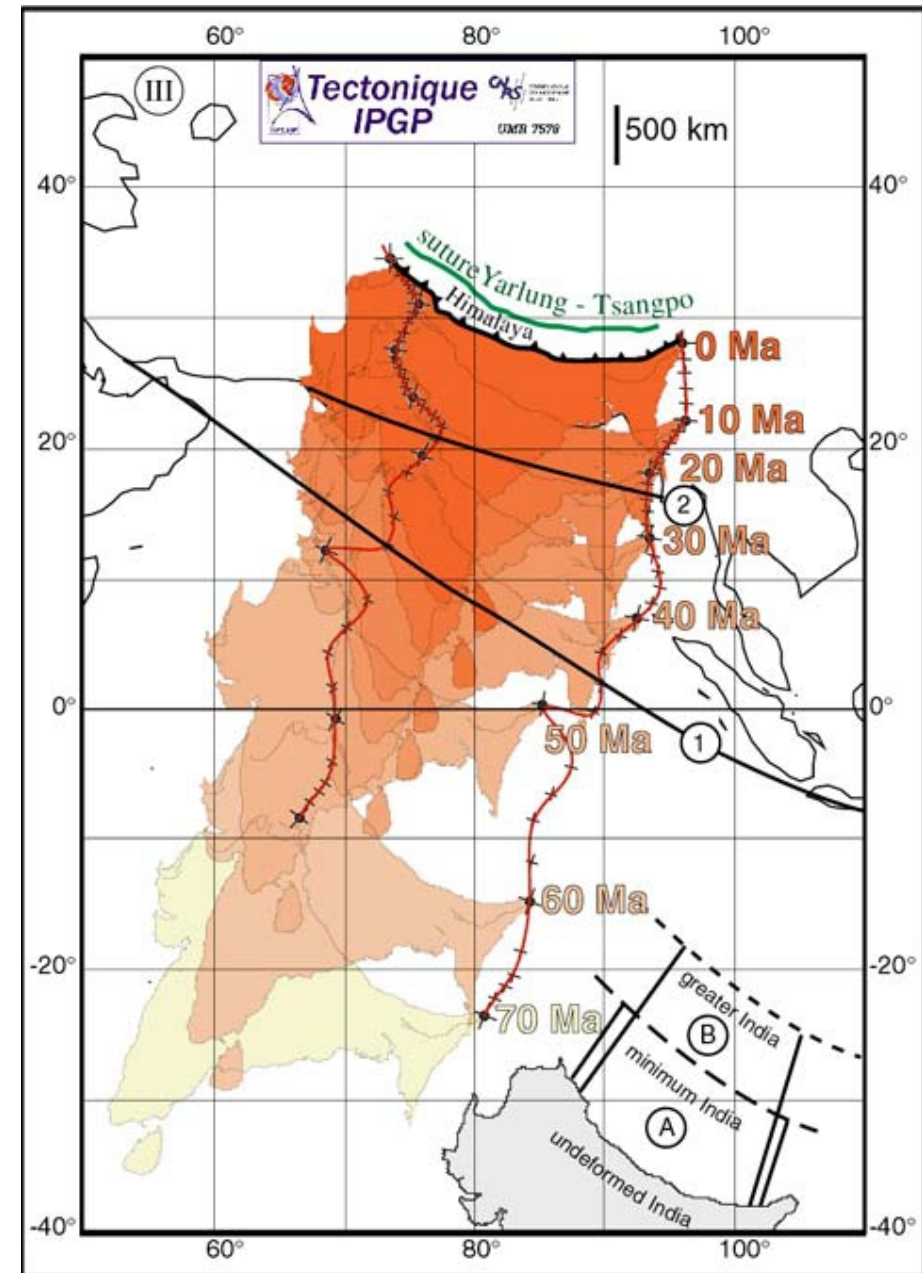
II) La grande variation climatique du Cénozoïque

B) Une hypothèse orogénique

1) L'édification d'un relief



<https://ccgm.org/fr/accueil/155-carte-de-l-ocean-indien-9782917310205.html>



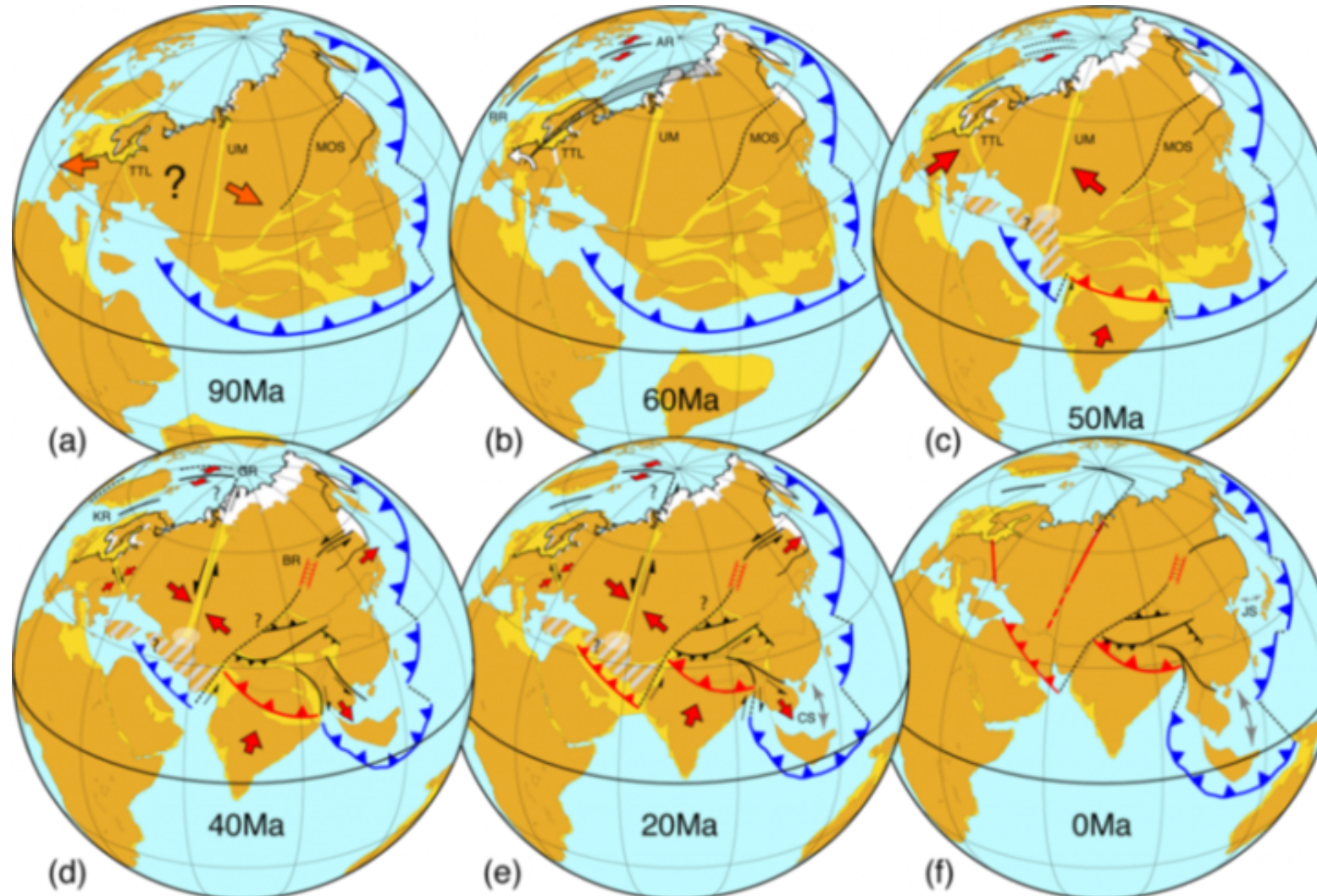
<http://www.ipgp.fr/fr/seisme-de-wenchuan>

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

B) Une hypothèse orogénique

1) L'édification d'un relief

Reconstructions paléogéographique de l'Asie de l'Est



Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - 2) Des indices biologiques
 - B) Une hypothèse orogénique
 - 1) L'édification d'un relief
 - 2) L'altération du relief
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

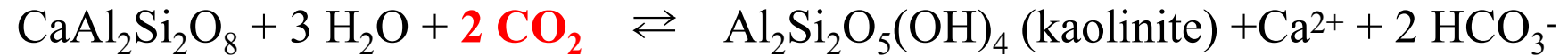
II) La grande variation climatique du Cénozoïque

B) Une hypothèse orogénique

2) L'altération du relief

Quelques réactions d'altération

Par exemple l'altération de l'**anorthite**, silicate calcique s'écrit :



On observe donc la consommation de 2 moles de CO_2 par altération d'une mole d'anorthite.

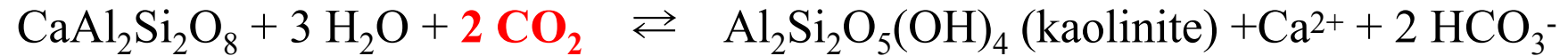
II) La grande variation climatique du Cénozoïque

B) Une hypothèse orogénique

2) L'altération du relief

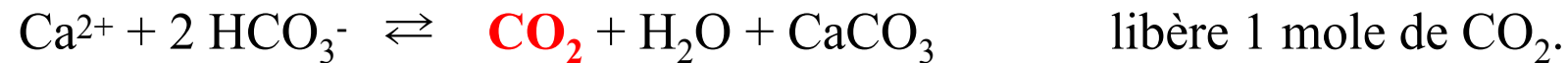
Quelques réactions d'altération

Par exemple l'altération de l'**anorthite**, silicate calcique s'écrit :



On observe donc la consommation de 2 moles de CO_2 par altération d'une mole d'anorthite.

Lorsque HCO_3^- arrive en mer, la précipitation de **calcite** CaCO_3 selon la réaction :



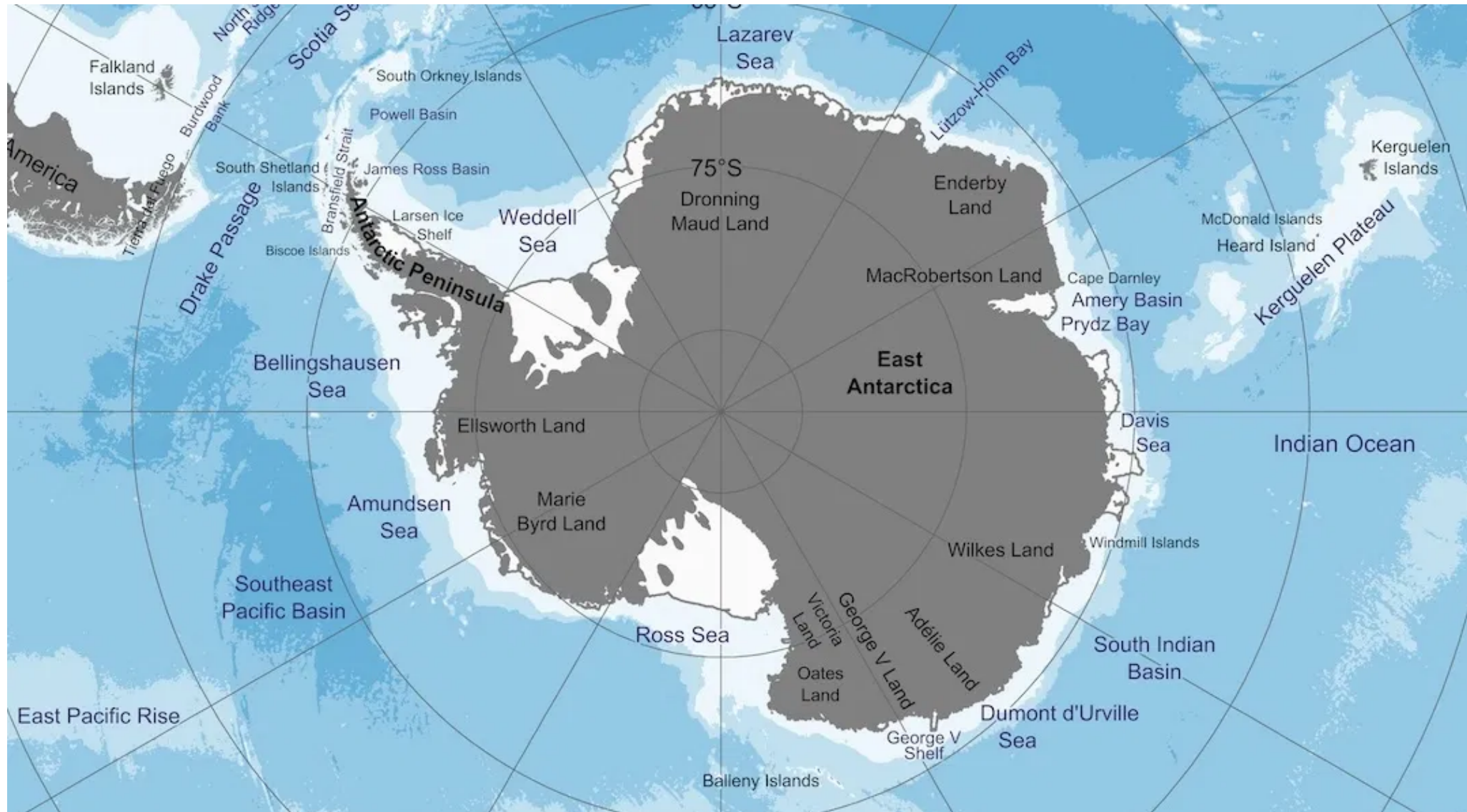
Donc finalement l'altération d'une mole d'anorthite a pompé une mole de CO_2 dans l'atmosphère.

Plan du chapitre

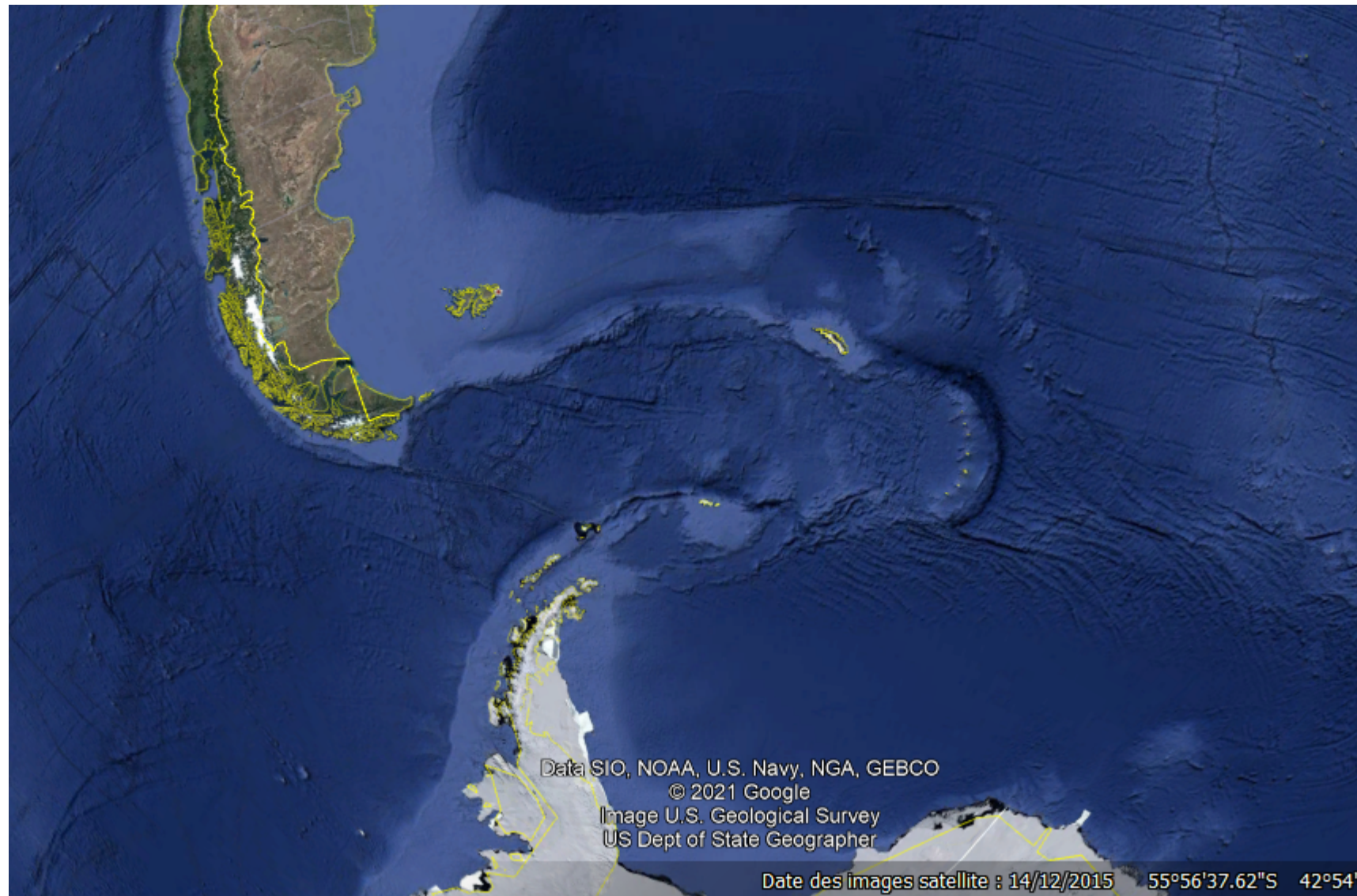
- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - 1) Des mesures isotopiques
 - 2) Des indices biologiques
 - B) Une hypothèse orogénique
 - 1) L'édification d'un relief
 - 2) L'altération du relief
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

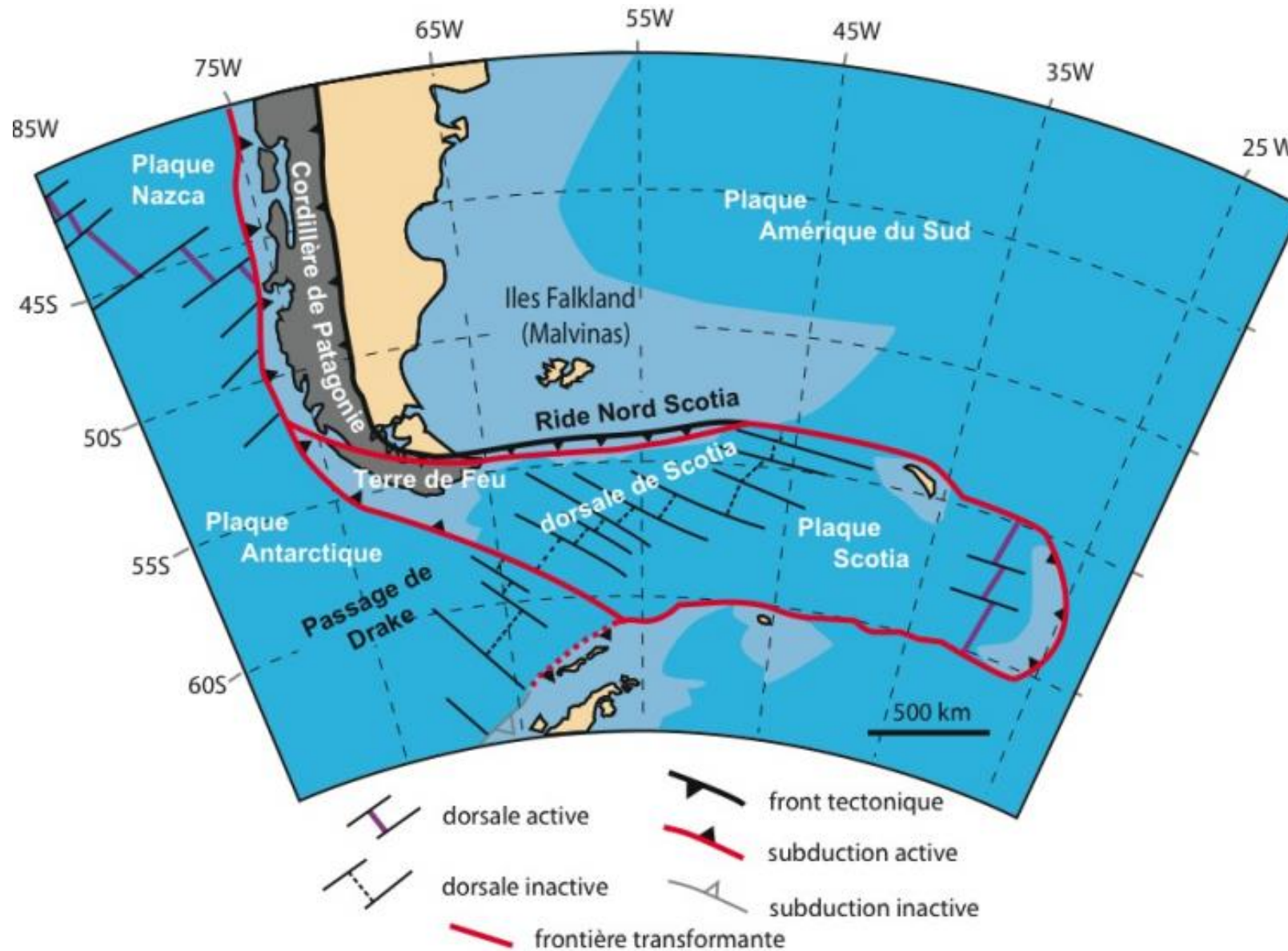


- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
- C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique



II) La grande variation climatique du Cénozoïque

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

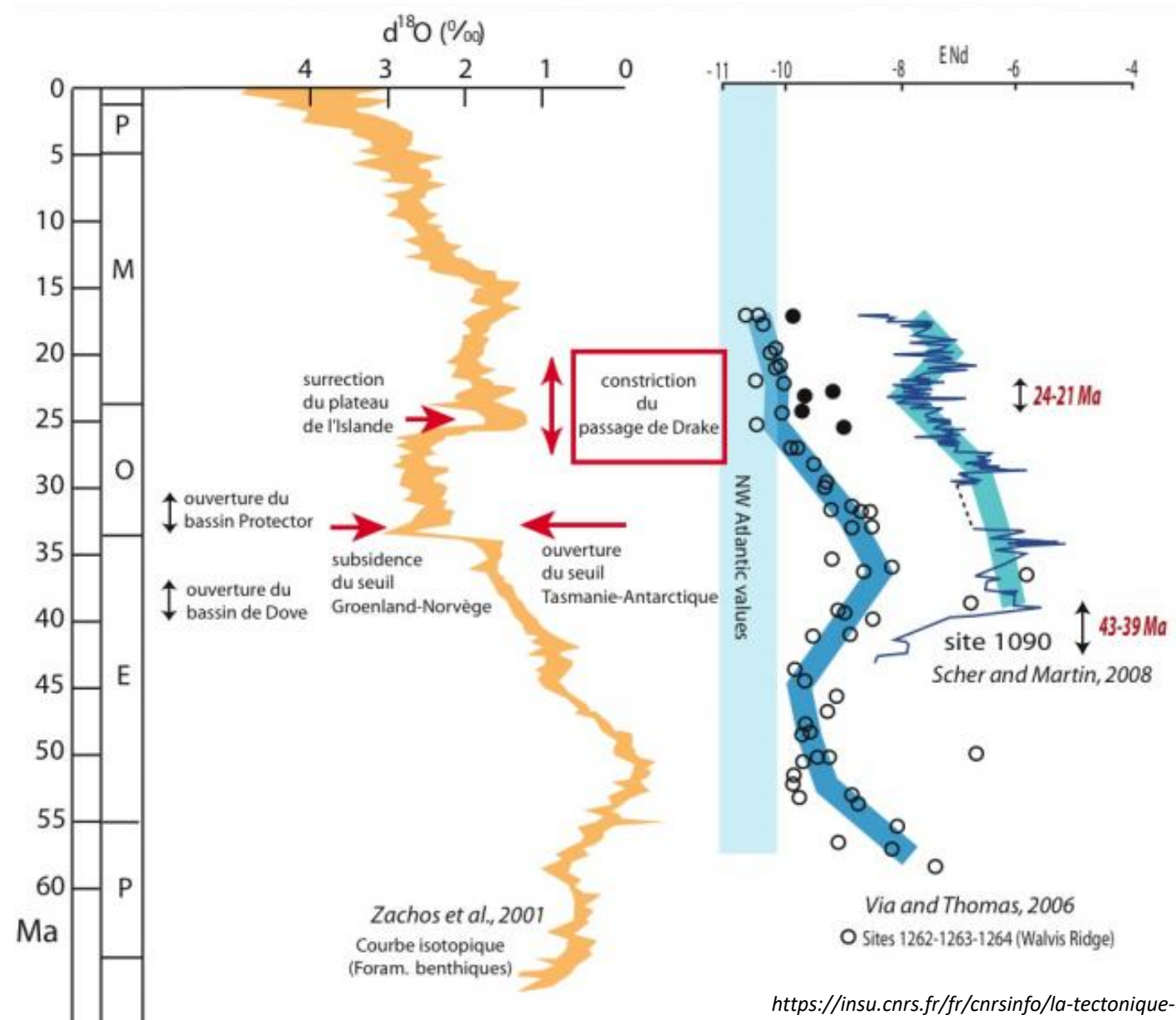


Carte tectonique du passage de Drake
© Lagabrielle et al.
EPSL 2009

II) La grande variation climatique du Cénozoïque

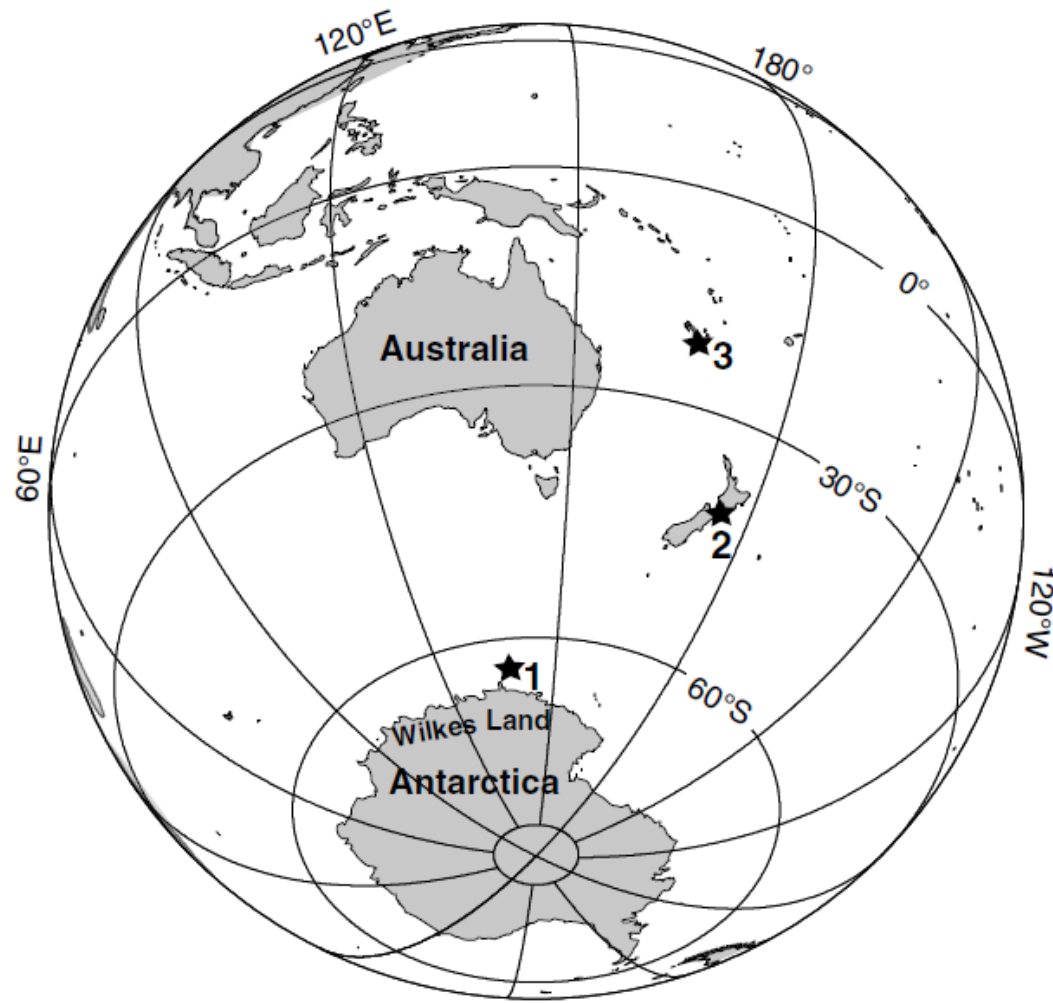
C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique

Compilations de mesures isotopiques sur des microfossiles issus de centaines de forages

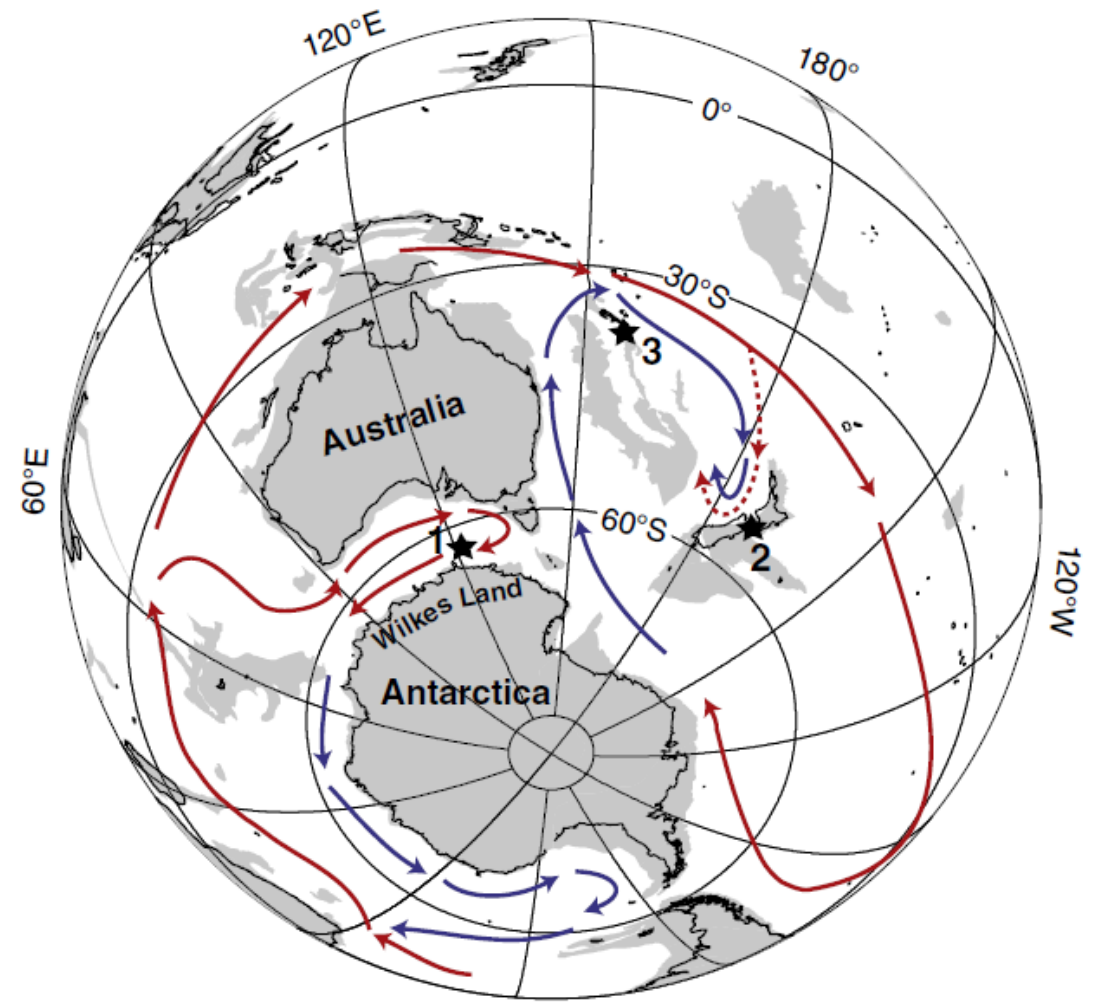


II) La grande variation climatique du Cénozoïque

C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique



Situation géographique actuelle
1 : site de forage IODP 1356



Situation géographique à l'Eocène
inférieur à moyen (56 à 45 Ma)

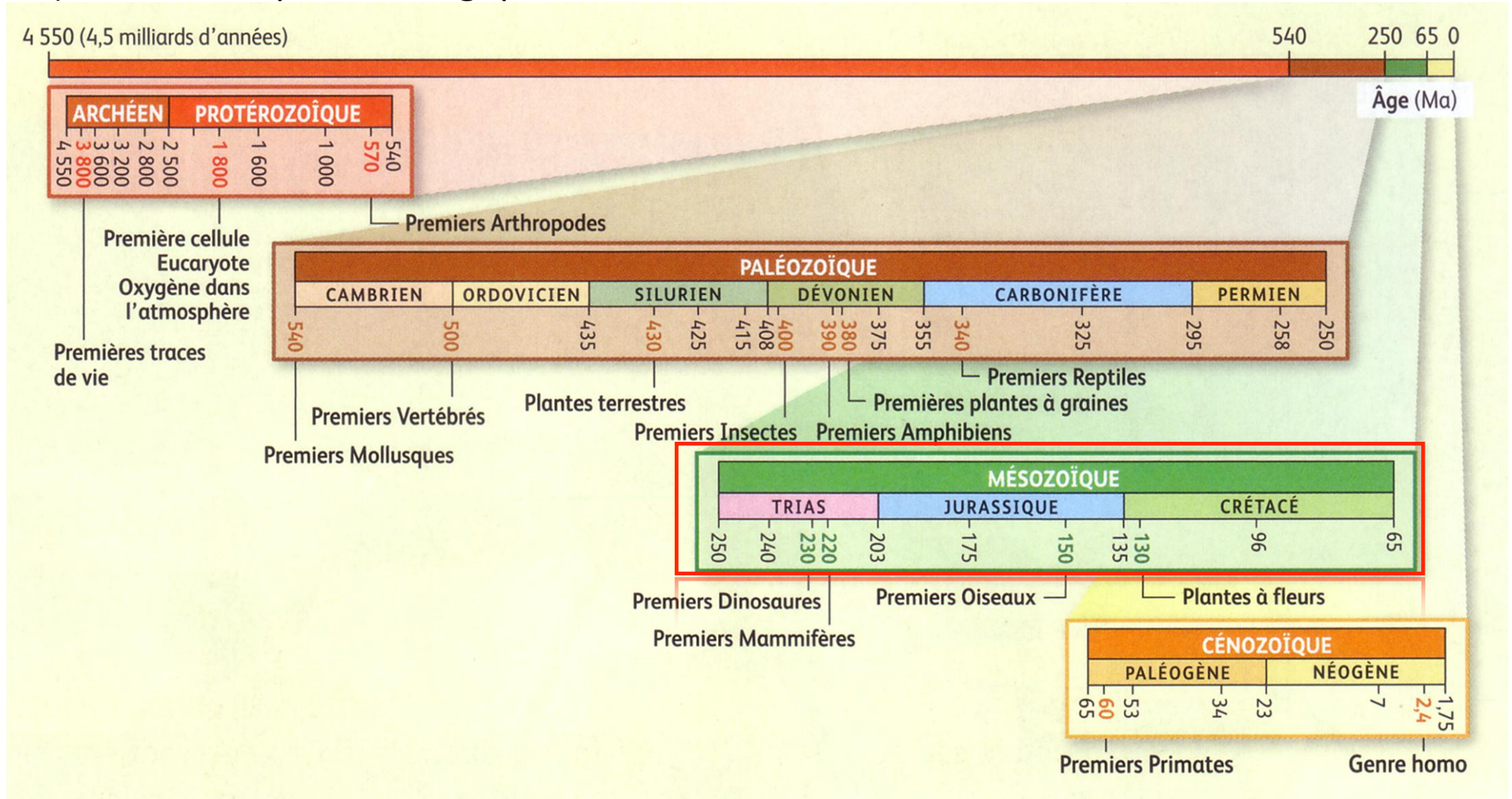
Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - 1) Des indices paléontologiques
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

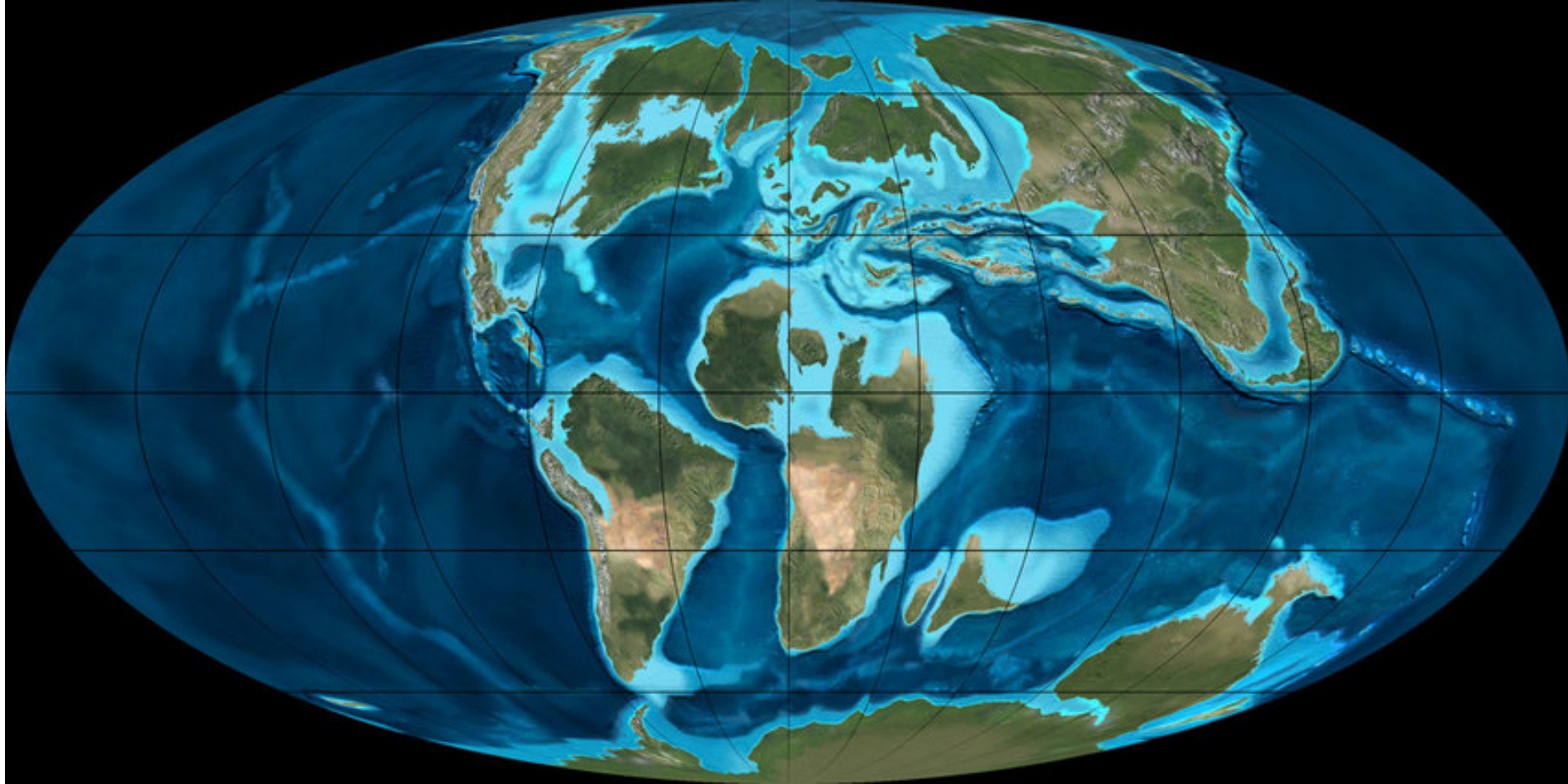
1) Des indices paléontologiques



III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

1) Des indices paléontologiques

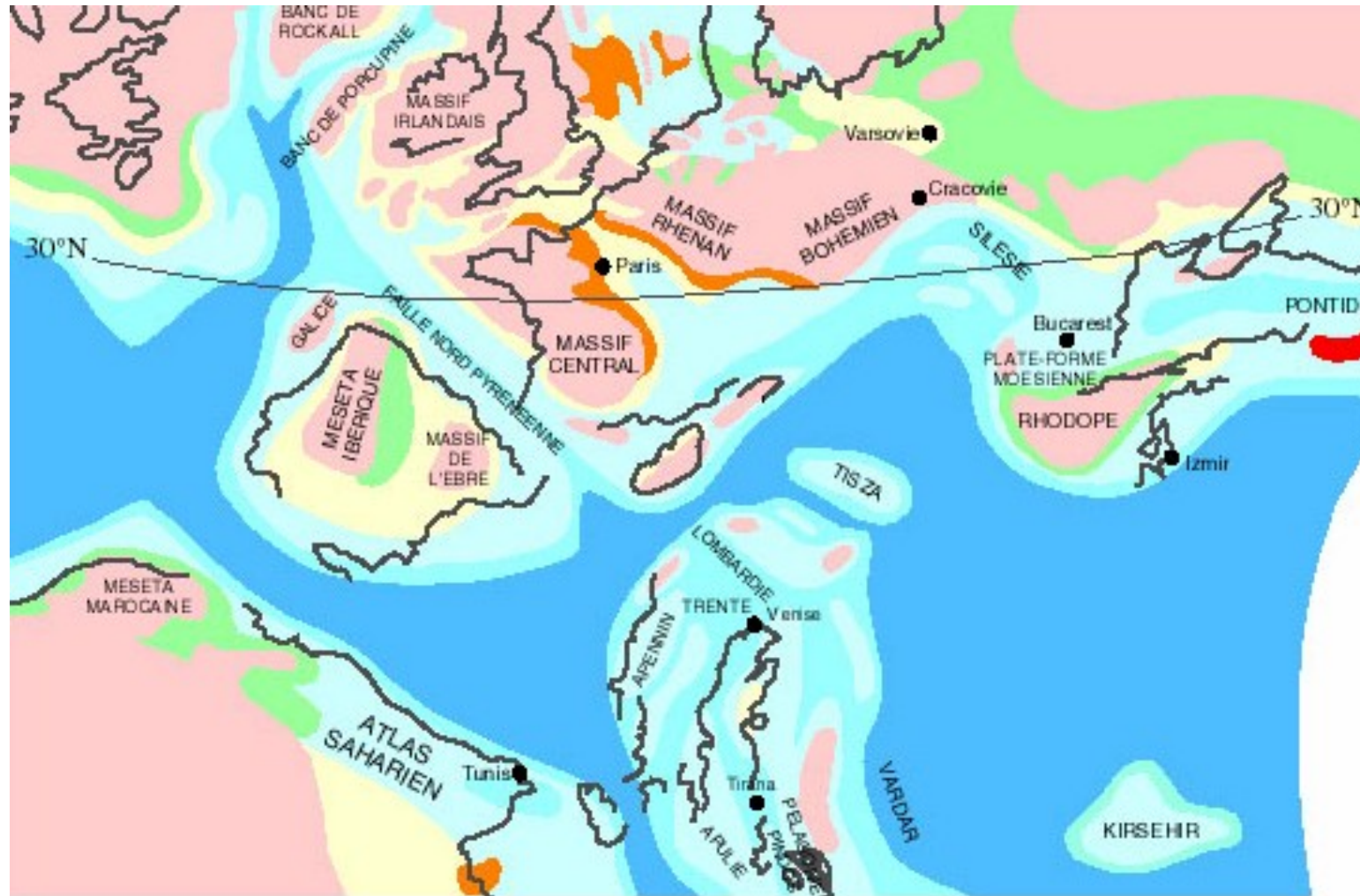


Paléogéographie au Crétacé supérieur (Cénomanien, 94 Ma)

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

1) Des indices paléontologiques



Paléogéographie de l'Europe au Crétacé inférieur (Aptien, 122 Ma)

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

1) Des indices paléontologiques

Arbre à pain actuel (*Artocarpus altilis*, Moracée)
Fossiles retrouvés en Alsaka et Groenland



https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_%C3%A0_pain#/media/Fichier:Starr_031209-0031_Artocarpus_altilis.jpg

Récifs à Rudistes, Crétacé
supérieur (Santonien), La-
Cadière-d'Azur, Var



© P.Baly

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - 1) Des indices paléontologiques
 - 2) Des indices sédimentaires
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

2) Des indices sédimentaires



Falaise d'Etretat, Normandie

Falaise de Douvres, Kent

© P.Baly

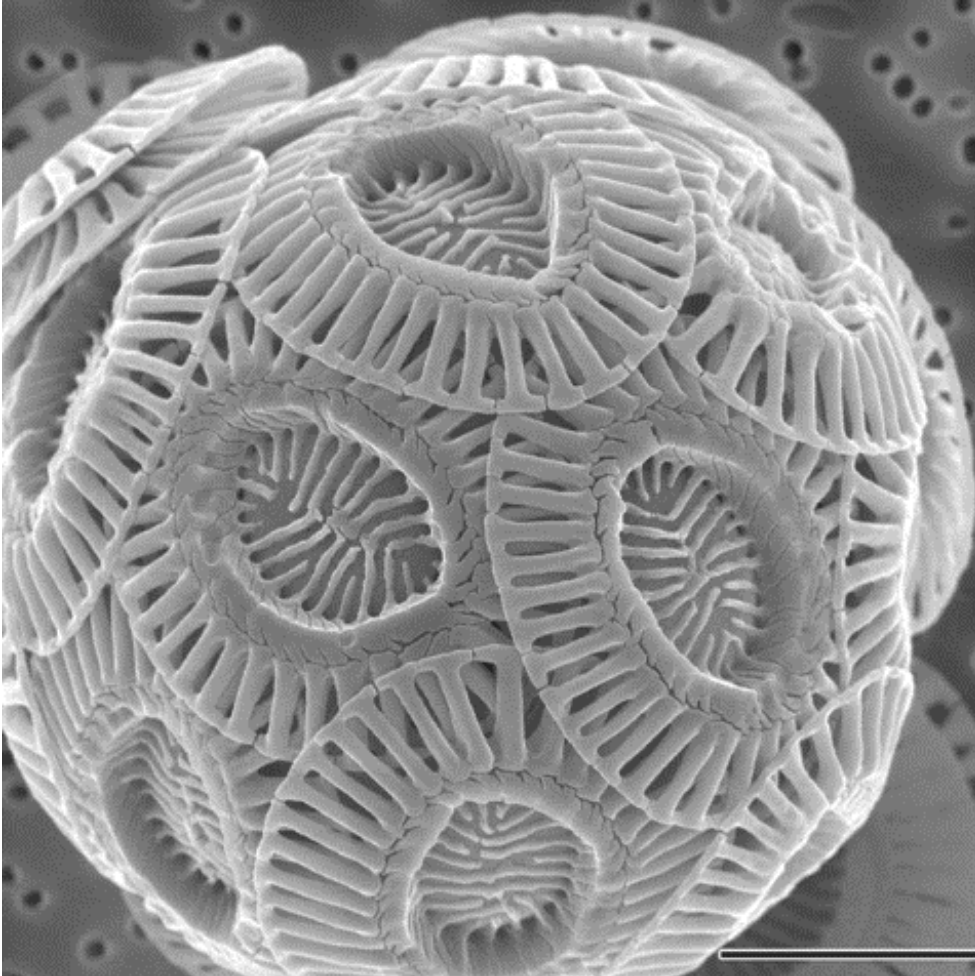


III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

1) Des indices paléontologiques

Deux exemples de Coccolithophoridés : *Emiliana huxleyi* et *Gephyrocapsa oceanica*



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Emiliana_huxleyi_coccolithophore_%28PLoS%29.png



https://fr.wikipedia.org/wiki/Coccosphaerales#/media/Fichier:Gephyrocapsa_oceanica_color.jpg

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

A) Des indices d'une période chaude à très chaude...

1) Des indices paléontologiques



Efflorescence algale *d'Emiliana huxleyi* photographié par Landsat le 24 juillet 1999

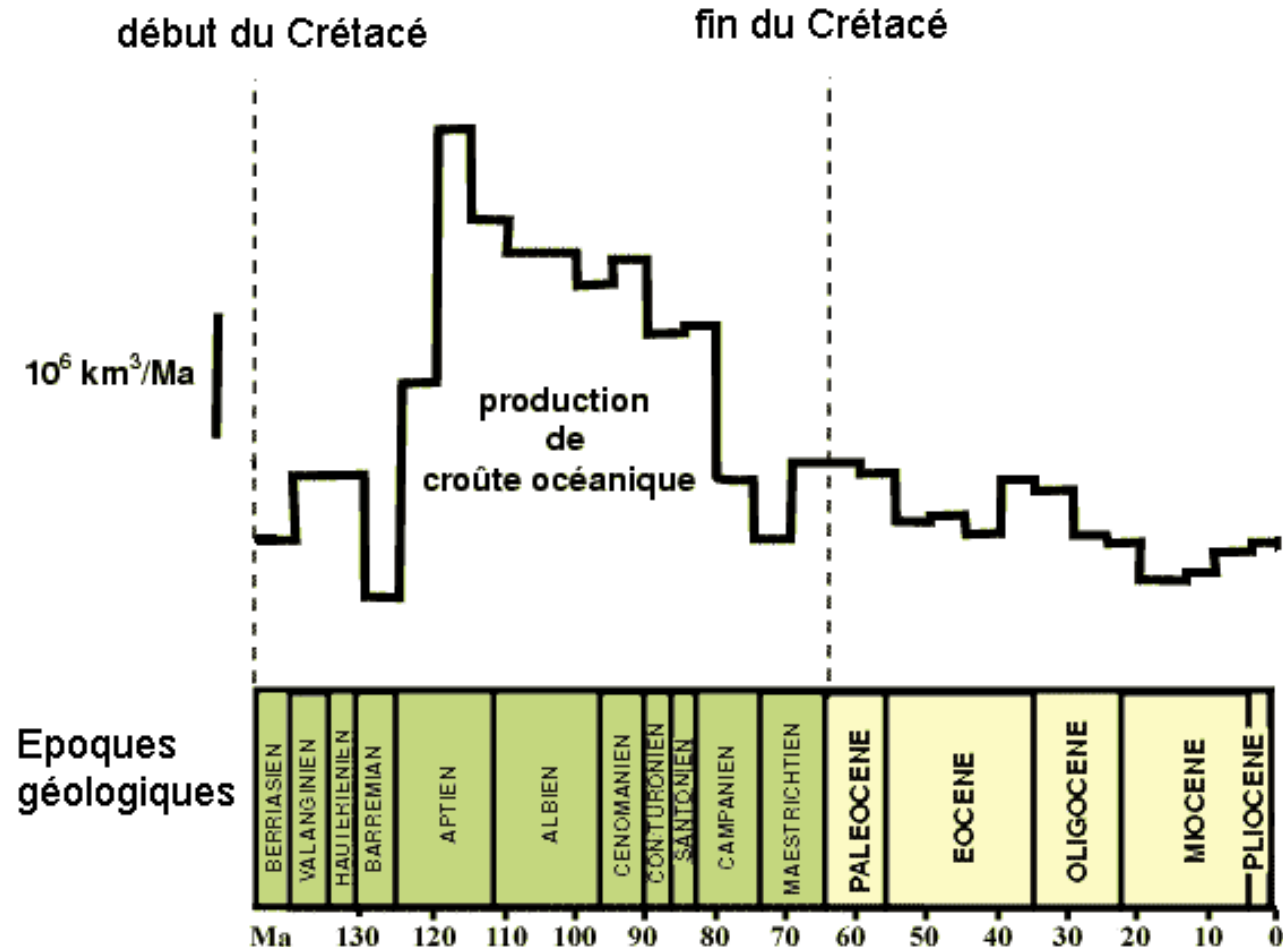
Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - 1) Des indices paléontologiques
 - 2) Des indices sédimentaires
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

III) La stabilité climatique du Mésozoïque

B) ...et une cause de grande profondeur

Évaluation de la production de croûte océanique par les dorsales océaniques



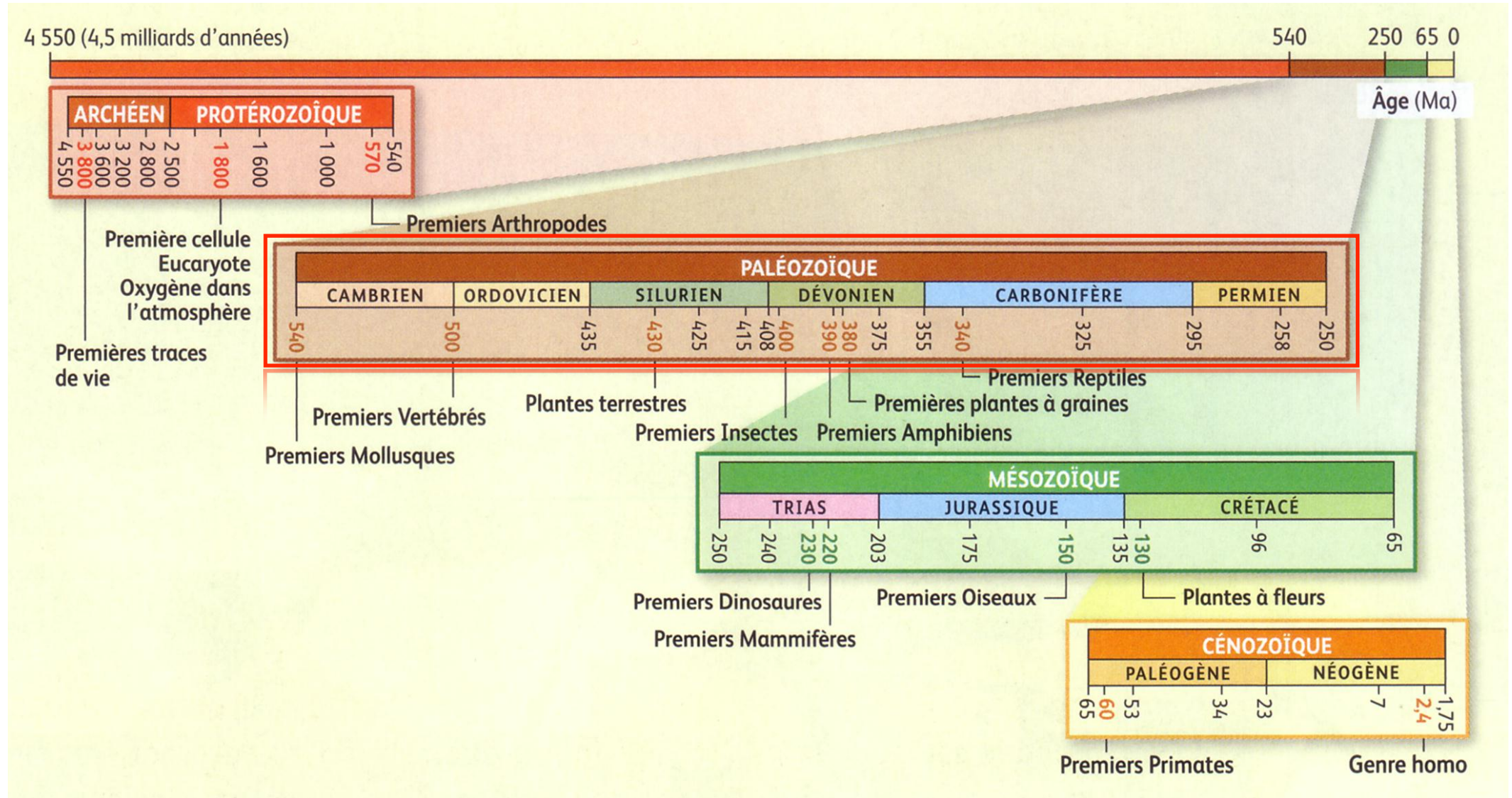
Lethiers, d'après l'article de E G Kaufman et M B Hart, 1996, Cretaceous bio-events, in O H Walliser ed., Global events and events stratigraphy, Springer, Berlin, 285-312.
Et dans sujet de baccalauréat S, Amérique du nord 2005.

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

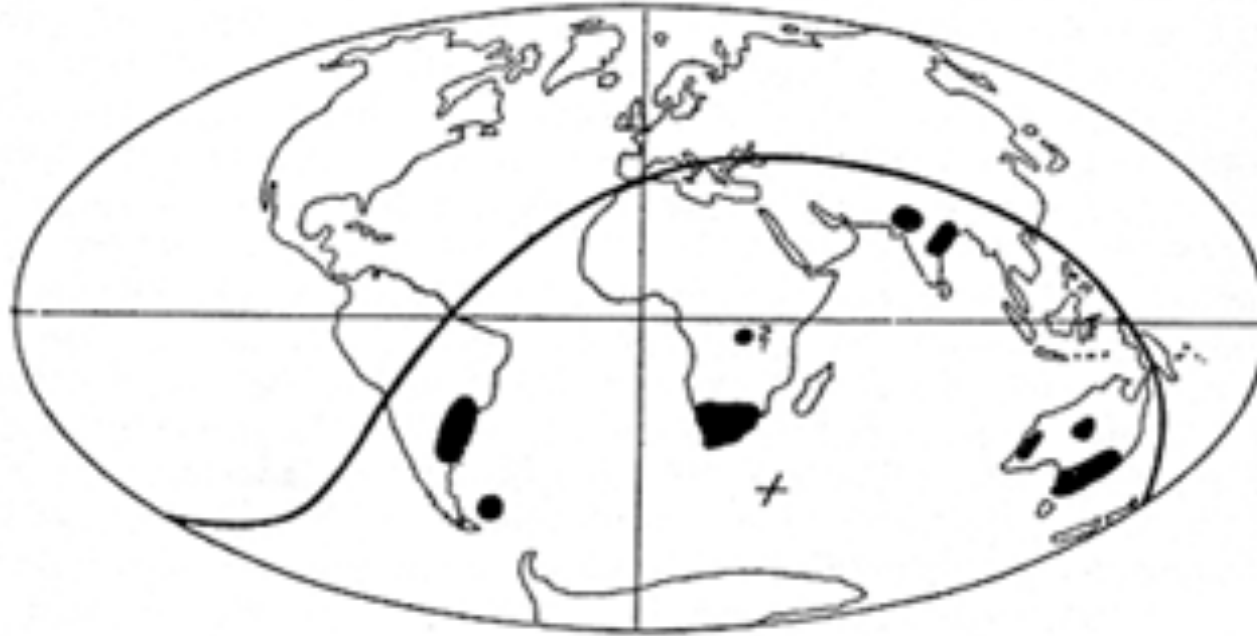
A) Des traces d'une glaciation mondiale



IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

Les traces de la glaciation permo-carbonifère sur les continents actuels.



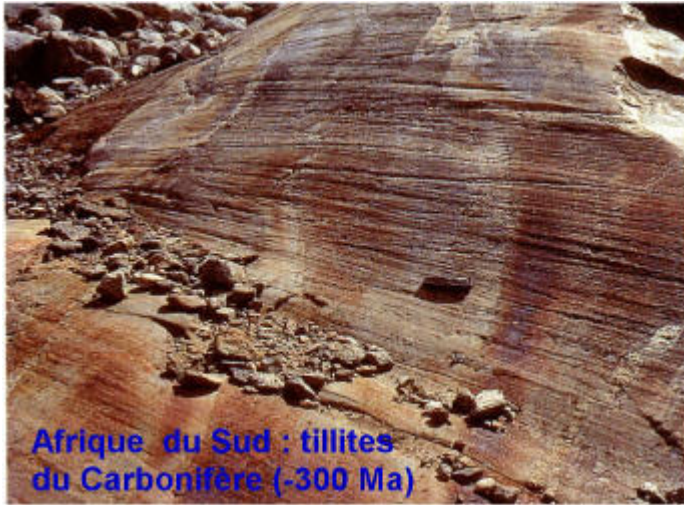
Ce document correspond à la figure 34 de A. Wegener, La dérive des continents, 1912, p.128

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

A) Des traces d'une glaciation mondiale

Reconstitution de la paléogéographie au Carbonifère

Stries et tillite...



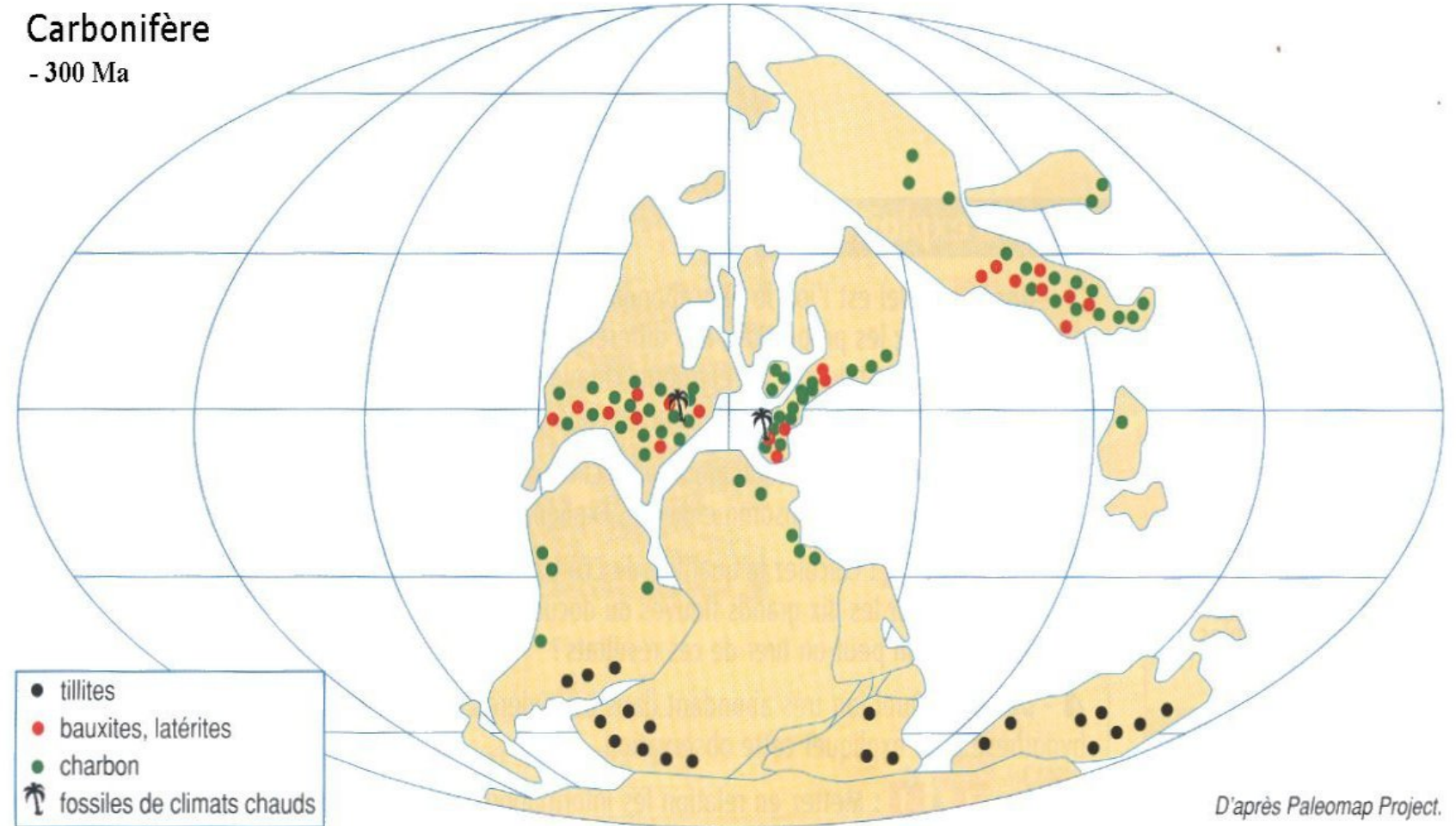
Afrique du Sud : tillites
du Carbonifère (-300 Ma)

http://www.incertae-sedis.fr/gl/docut853_01_climats_froids.htm



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Tillite#/media/Fichier:Till_after_avalanche_in_Norway_\(2\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tillite#/media/Fichier:Till_after_avalanche_in_Norway_(2).jpg)

Carbonifère
- 300 Ma



D'après Paleomap Project.

Plan du chapitre

- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte
 - 1) Une origine biologique

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

1) Une origine biologique

Vue de la carrière de
Graissessac (34),
anciennement exploitée
pour son charbon

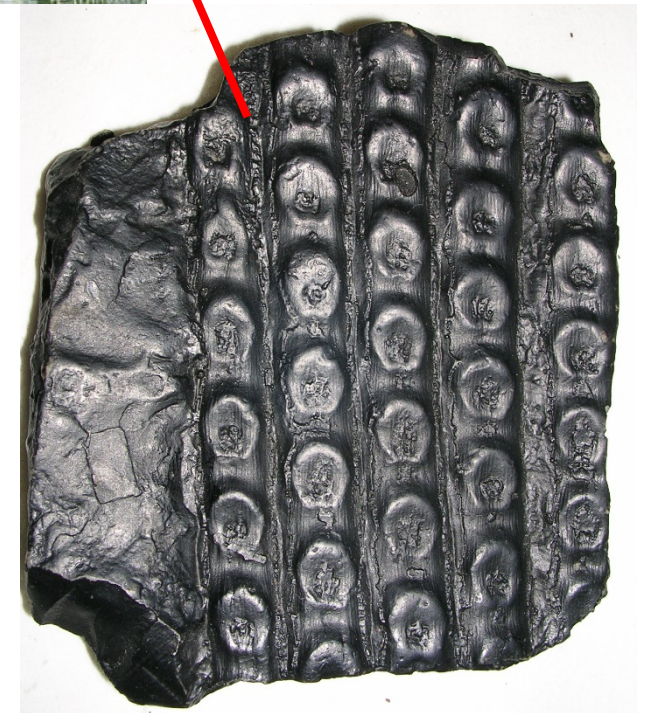


IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

1) Une origine biologique

Quelques fossiles végétaux
du Carbonifère, et
proposition de reconstitution
d'un paysage de l'époque

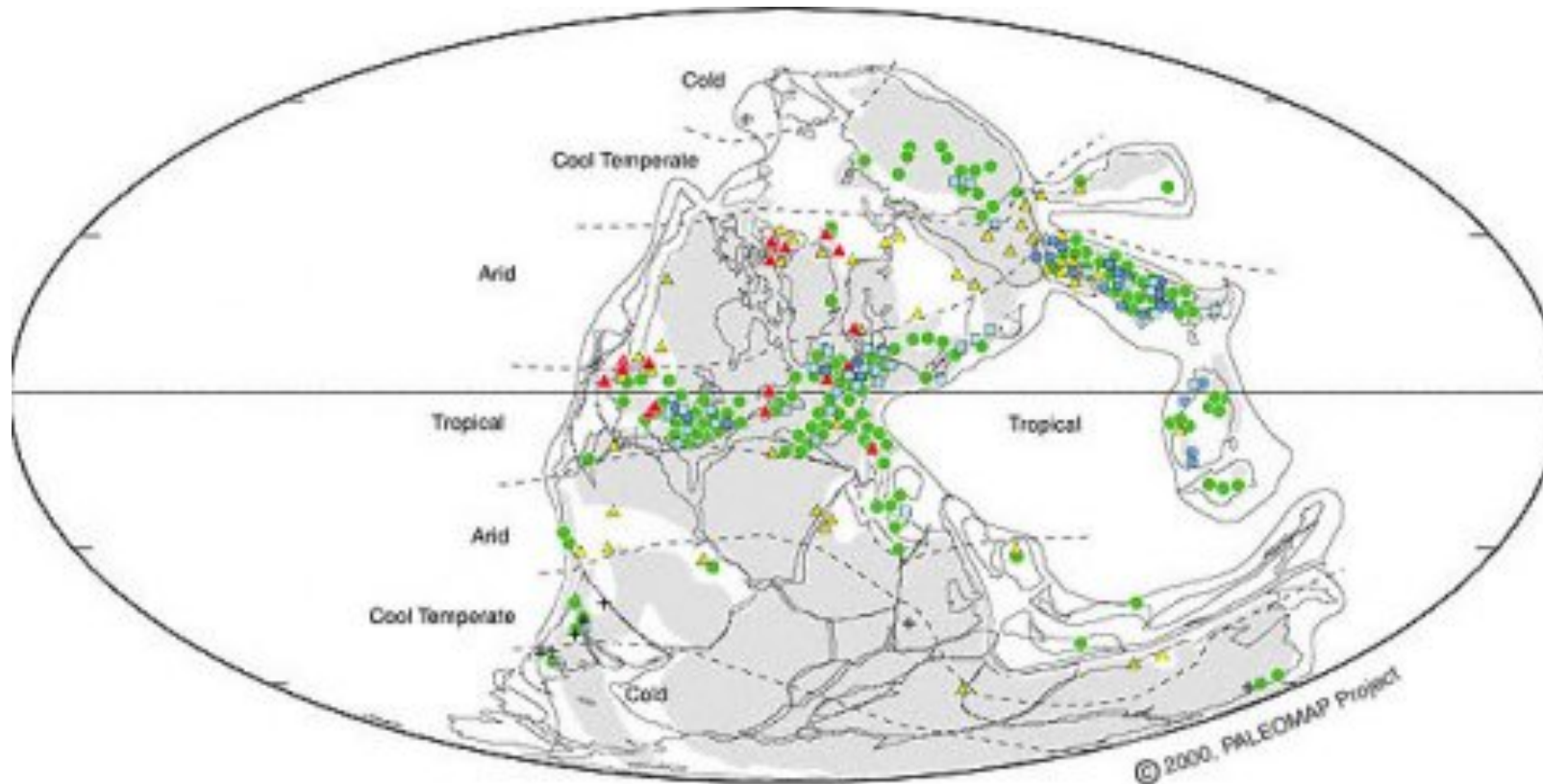


IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

1) Une origine biologique

Paléogéographie au Carbonifère supérieur (323-315 Ma)



Upper Carboniferous (Bashkirian - Moscovian)

LEGEND

	WARM	COOL
	<i>Tropical</i>	<i>Cool Temperate</i>
	● Coal	● Coal & Tillites
	● Bauxite	
	● Laterite	
	<i>Warm Temperate</i>	
	■ Kaolinite (& coal & evaporite)	
	🌴 Crocodiles 🐊	
	🌴 Palms & Mangroves 🌴	
	<i>Arid</i>	<i>Cold</i>
	▲ Evaporite	⊕ Tillite
	▲ Calcrete	⊕ Dropstone
		● Glendonite
WET		
DRY		

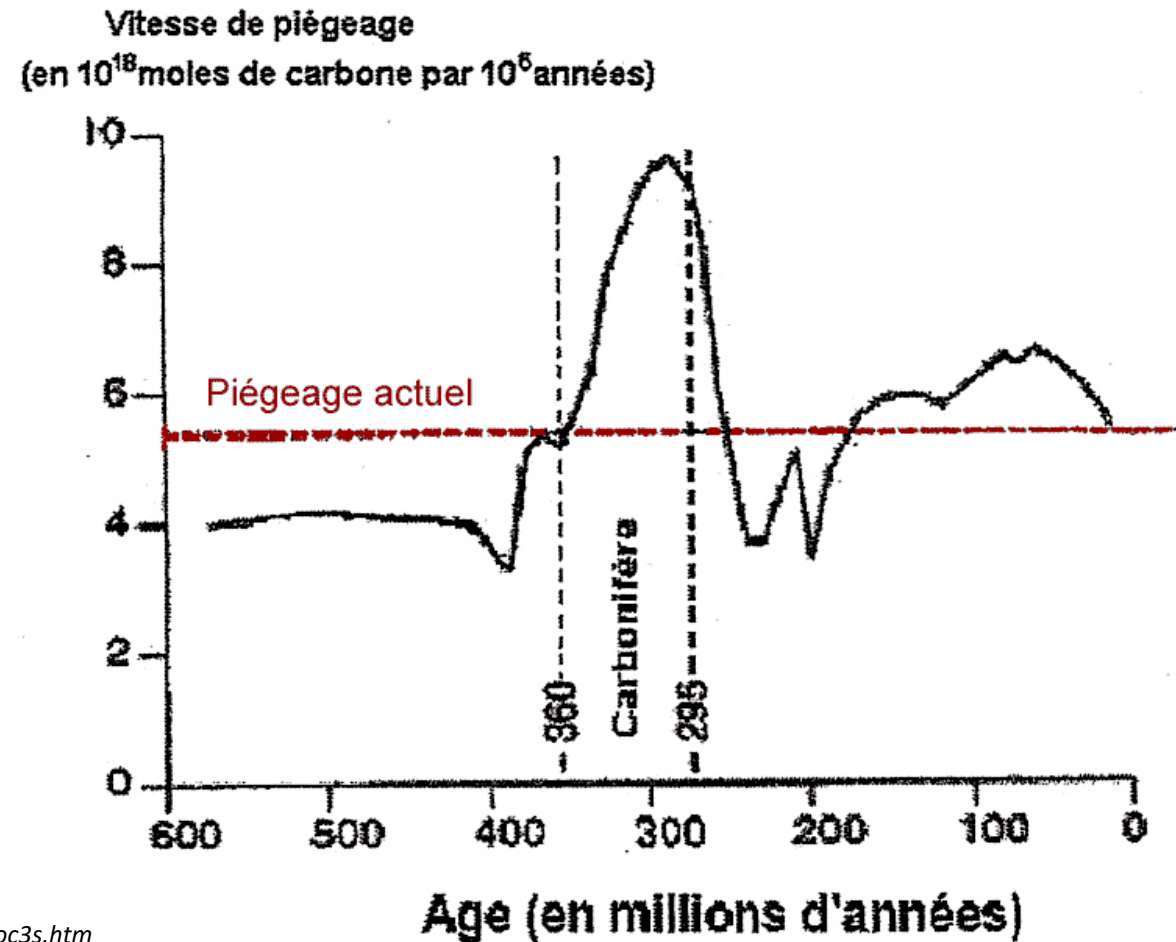
"Paratropical" = High Latitude Bauxites

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

1) Une origine biologique

Estimation de la vitesse de piégeage de carbone atmosphérique par fossilisation de matière organique



Plan du chapitre

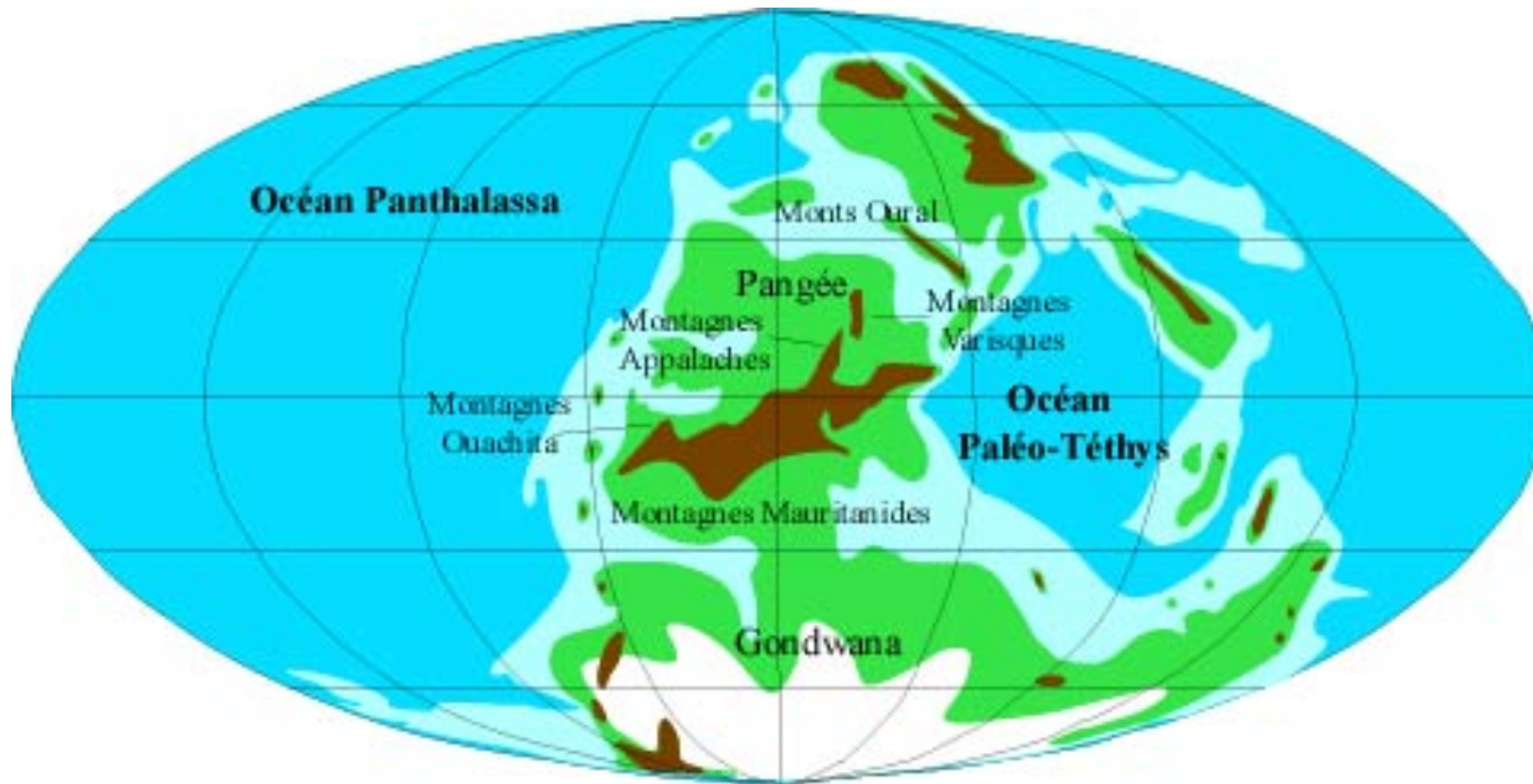
- I) Les variations climatiques depuis 800 000 ans
 - A) Les outils d'étude des climats anciens
 - B) Les variations cycliques du climat
- II) La grande variation climatique du Cénozoïque
 - A) Des indices d'un refroidissement généralisé
 - B) Une hypothèse orogénique
 - C) La mise en place d'un courant circumpolaire Antarctique
- III) La stabilité climatique du Mésozoïque
 - A) Des indices d'une période chaude à très chaude...
 - B) ...et une cause de grande profondeur
- IV) Les variations climatiques du Paléozoïque
 - A) Des traces d'une glaciation mondiale
 - B) Une origine mixte
 - 1) Une origine biologique
 - 2) Complétée par la tectonique

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

2) Complétée par la tectonique

Paléogéographie au Carbonifère supérieur (323-315 Ma)



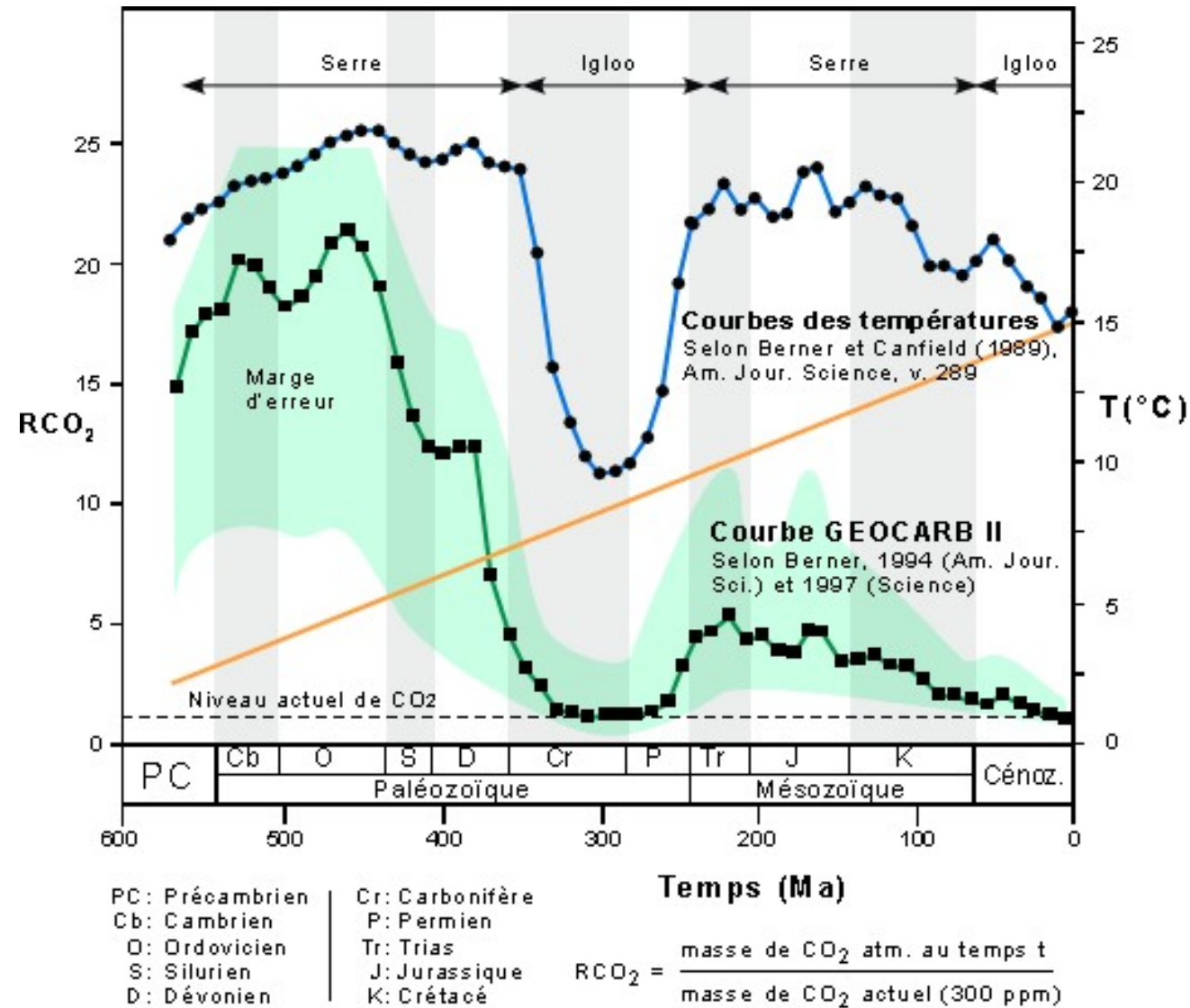
Légende :

- **bleu foncé** : océans
- **bleu clair** : plateaux continentaux
- **vert** : zone émergée végétalisée
- **marron** : reliefs montagneux
- **blanc** : calotte polaire

IV) Les variations climatiques du Paléozoïque

B) Une origine mixte

2) Complétée par la tectonique



Conclusion :

Le climat de la Terre est donc variable, avec des périodes plus froides ou plus chaudes qu'aujourd'hui, à différentes échelles de temps (dizaines de Ma, centaines à dizaines de ka) : on ne peut donc pas parler de *dérèglement* climatique, au sens où il n'y a pas de règle...

Ces variations climatiques résultent de causes diverses, internes (tectonique des plaques et volcanisme) ou externes (position orbitale de la Terre, activité biologique), à des échelles de temps diverses, mais lentes. D'autres variations, antérieures au Phanérozoïque, ont été encore plus intenses, avec notamment des périodes dites *boules de neige*, où des calottes recouvraient la surface terrestre presque jusqu'à l'équateur !

Toutefois, l'étude de toutes ces variations, quelle que soit leur intensité, sont sans commune mesure avec la vitesse de la variation actuelle, d'origine anthropique, qui se mesure en décennies, et non en milliers ou millions d'années...quelles en seront les conséquences sur la vie ?

Mots-clés : effet de serre, gaz à effet de serre, cycle du carbone, cycles de Milankovitch, albédo, principe d'actualisme, rapports isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$), tectonique des plaques, circulation océanique.

<https://insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/la-tectonique-des-plaques-change-t-elle-le-climat-global>

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/plateau-Tibet.xml>

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/himalaya-pompe-co2.xml>