

# Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées sur de grandes échelles de temps



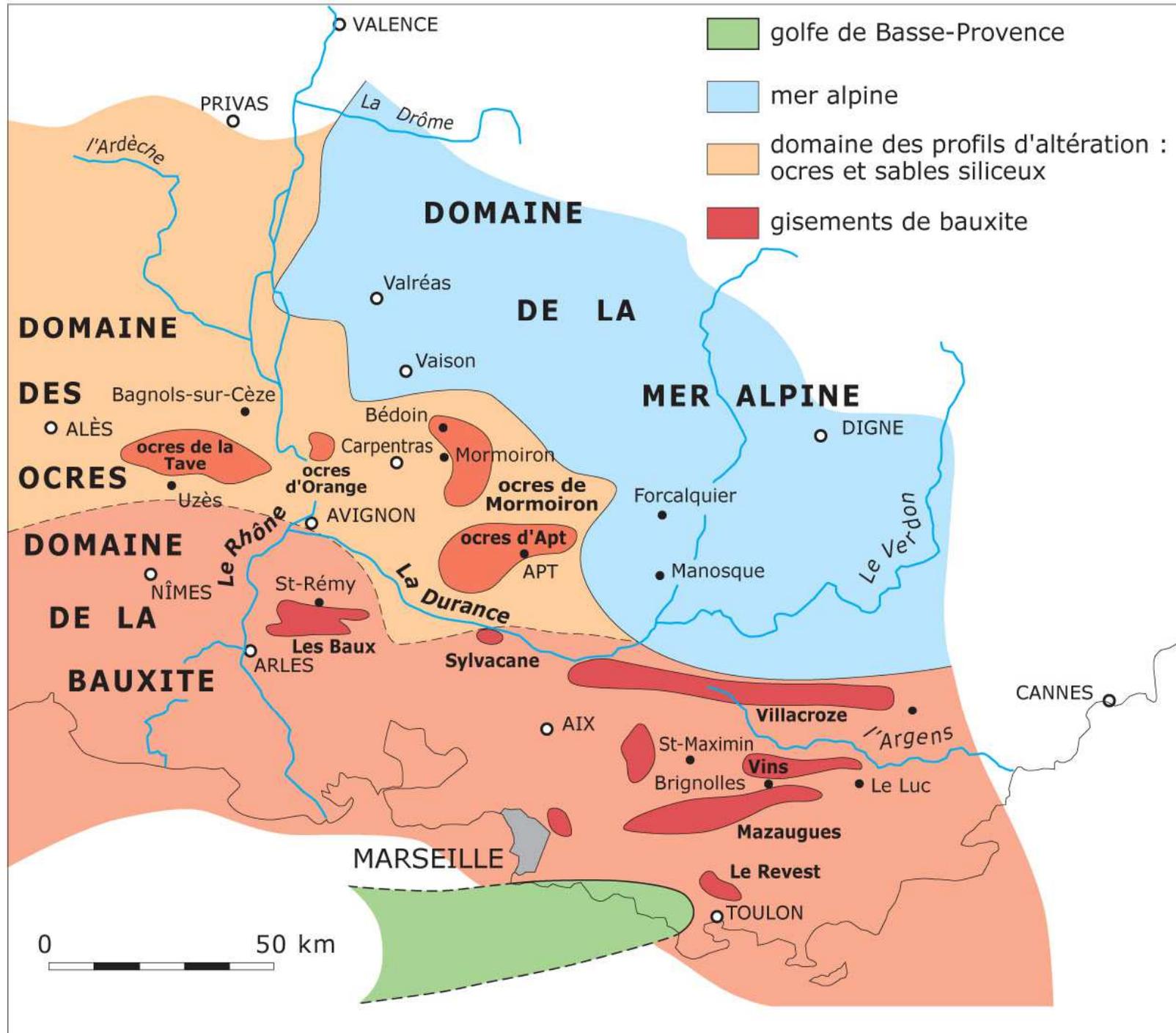
Reconstitution de l'environnement au Carbonifère (-350 MA). Vue d'artiste

Des indices **géochimiques** (données isotopiques), **paléontologiques** (fossiles) et **géologiques** (roches sédimentaires) permettent de reconstituer des tendances climatiques sur de plus grandes échelles de temps (500 derniers MA).

Les variations d'insolation liées aux paramètres **astronomiques** ne peuvent pas expliquer de telles variations climatiques importantes sur plusieurs dizaines de millions d'années. D'autres forçages ont dû jouer un rôle majeur : Modifications de l'**intensité** de l'effet de serre liées à des phénomènes **consommateurs** de CO<sub>2</sub> (piégeage de la matière organique, altération des grandes chaînes de montagne) ou libérateurs de CO<sub>2</sub> (volcanisme intense)

1. L'étude de certaines formations sédimentaires, des isotopes de l'oxygène des sédiments océaniques, des méthodes indirectes d'estimations de la teneur atmosphérique en  $CO_2$  permettent de reconstituer des climats très anciens.

# Ocres et Bauxites témoignent d'un climat tropical



Carte paléogéographique de la Provence au Crétacé et gisements d'ocre et bauxites

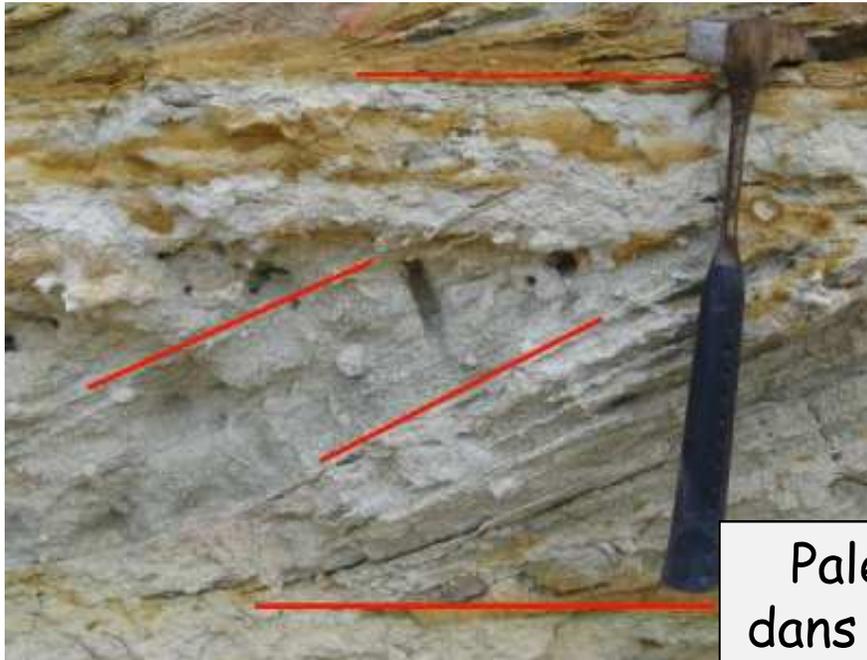
# Affleurement de sables ocreux à Rustrel

Crétacé	Supérieur		
		Coniacien	85,8– 89,3
		Turonien	89,3– 93,5
		Cénomanién	93,5– 99,6
	Albien	99,6– 112,0	
	Aptien	112,0– 125,0	

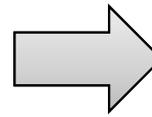


# Formation des sables ocreux par altération continentale de sables marins riches en glauconie

Sables verts du Collet de Flaqueirol



Sables ocreux de Roussillon et Rustrel



Paléo-altération  
dans des conditions  
tropicales

Smectites + quartz + glauconie

Kaolinite + quartz + Goethite et hématite

Argile TOT

Argile avec  $Fe^{3+}$

Argile TO

$FeO(OH)$

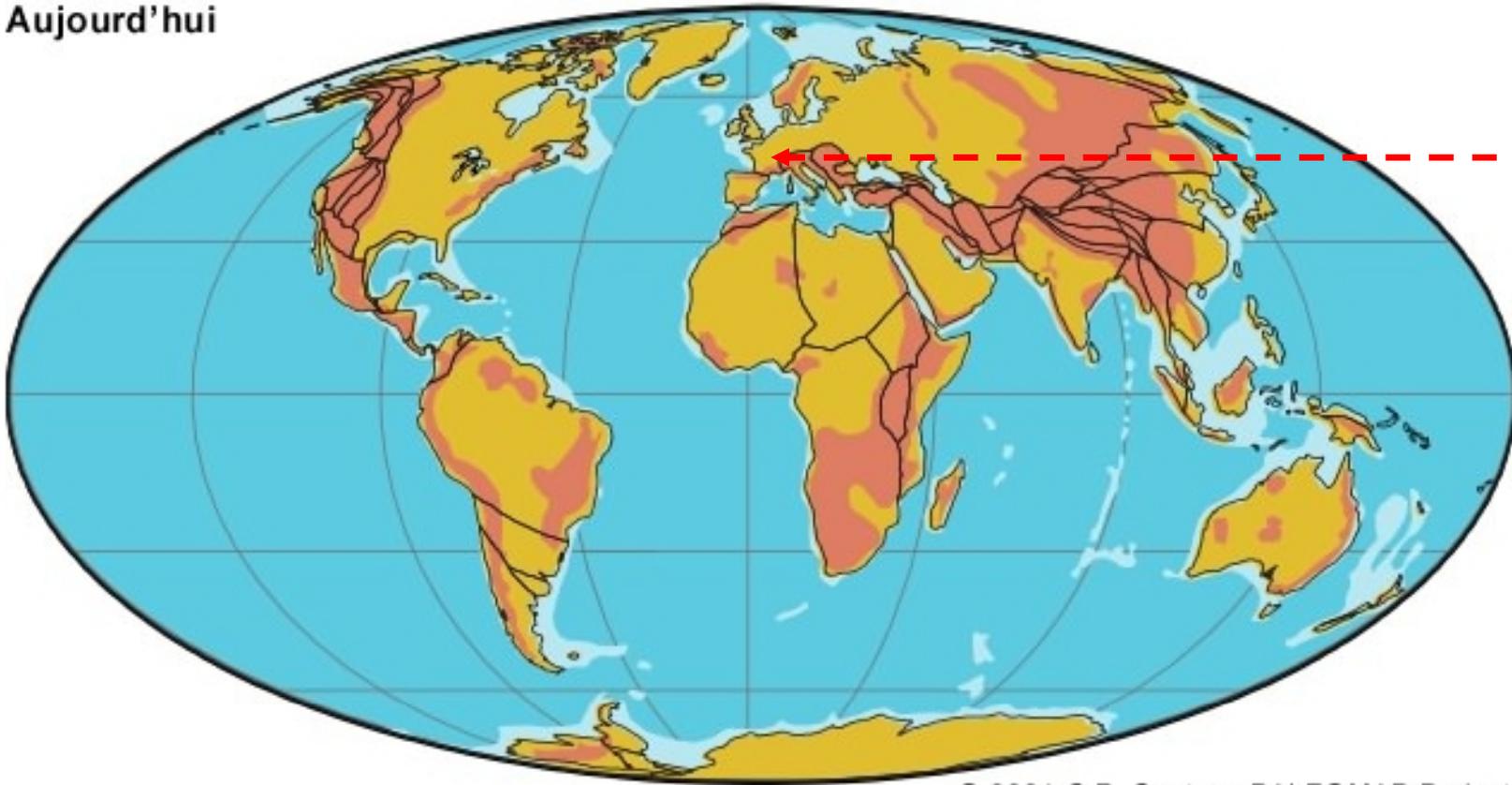
$Fe_2O_3$

## Sol latéritique en Nouvelle Calédonie (Mine de Nickel et Cobalt)



# Reconstitutions paléogéographiques et géodynamiques

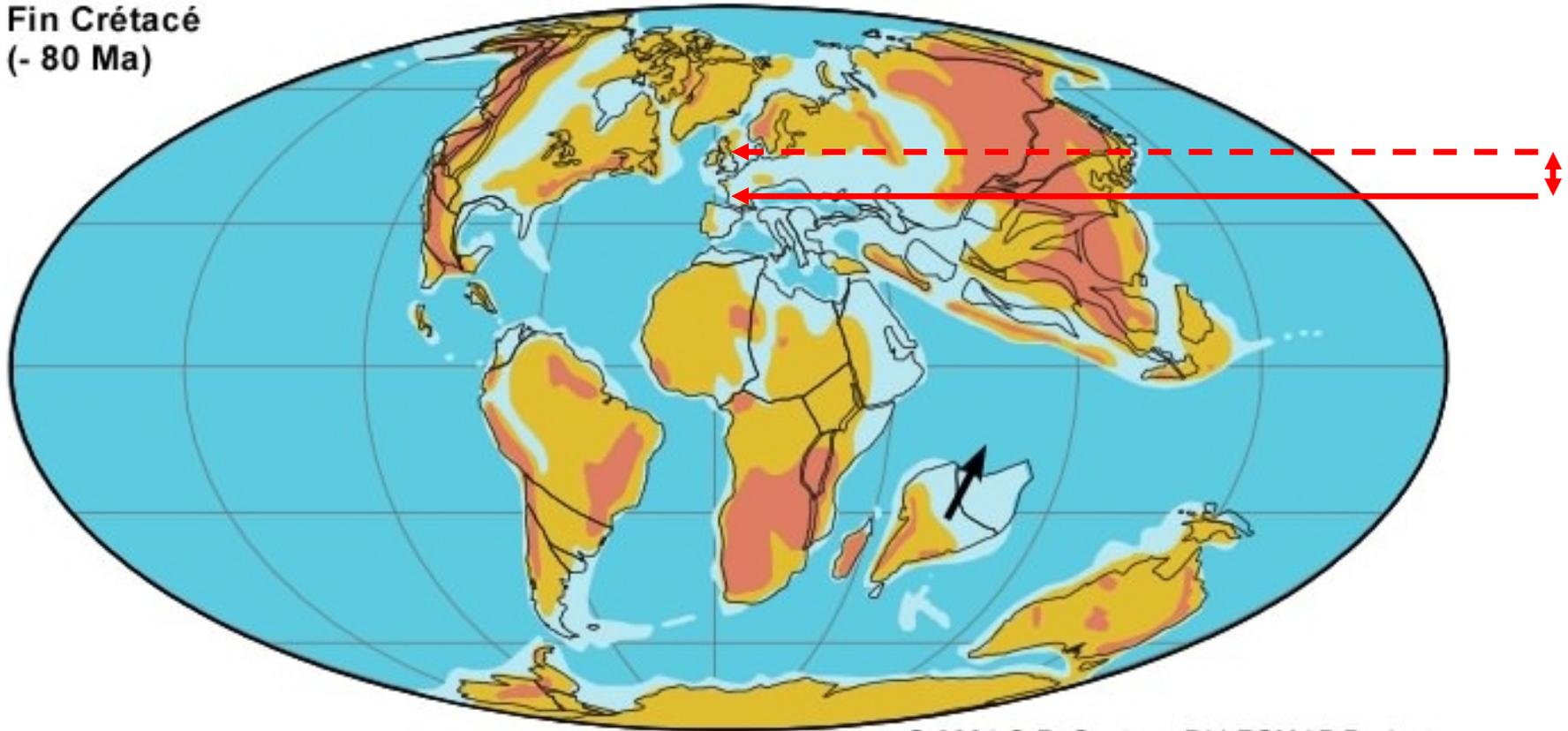
Aujourd'hui



© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

# Reconstitutions paléogéographiques et géodynamiques

Fin Crétacé  
(- 80 Ma)



Position de la Provence au Crétacé Sup (tropicque Cancer)  
→ Favorise conditions d'altération tropicales

# Evaporites, témoin d'un climat chaud et sec

## Carrière de gypse à Mazan (Vaucluse, Oligocène)



Rose de gypse de Gargas (Vaucluse)

# Évaporites, témoin d'un climat chaud et sec



Évaporites actuelles  
de la Mer Morte



Tillites = moraines consolidées (dépôts glaciaires)



Tillites permiennes, Beacon Valley, Victoria Land, Antarctique

# Indices paléontologiques

Récif à rudistes du Crétacé



Formation corallienne actuelles



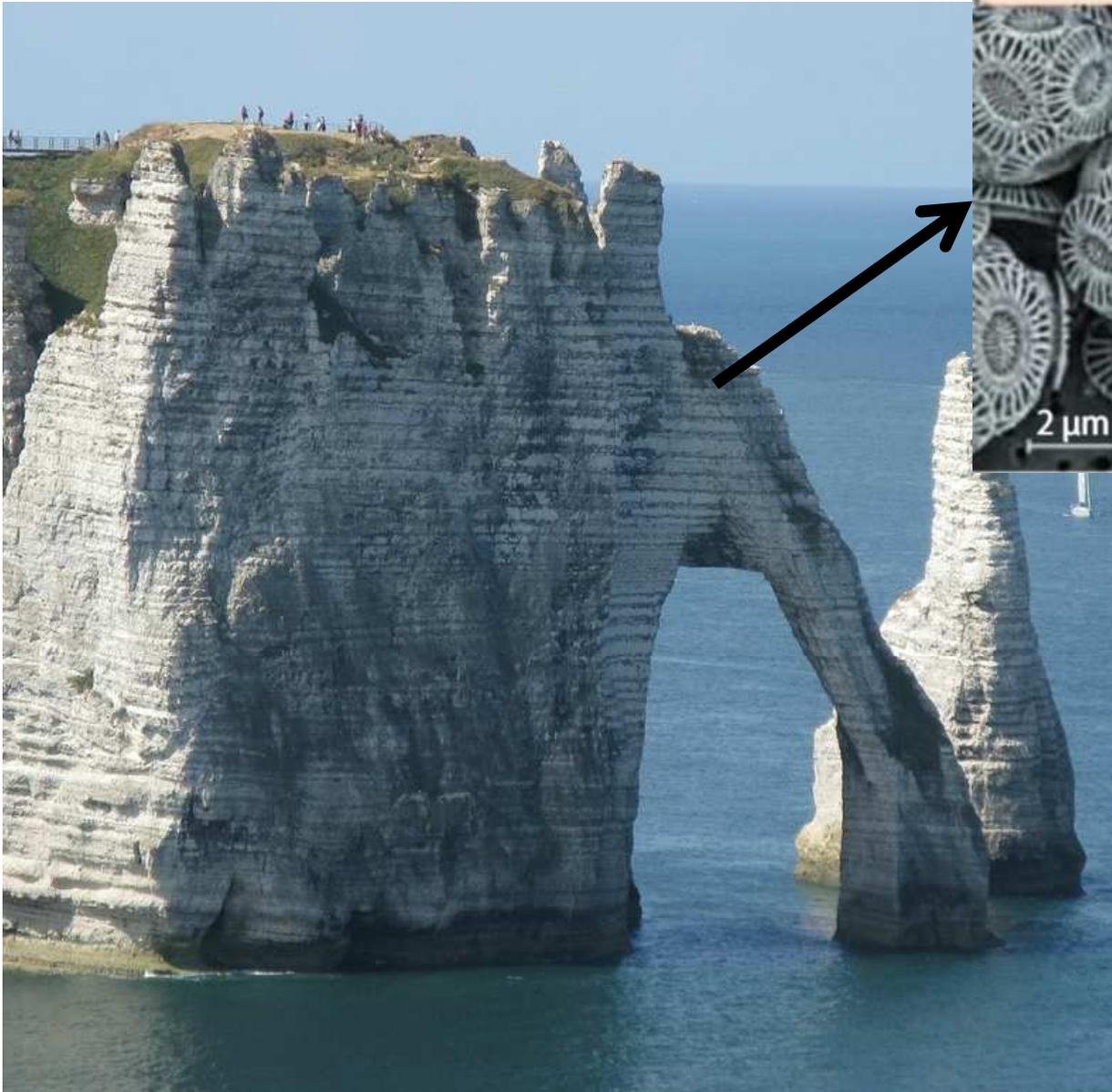
→ Climat tropical océanique

# Indices paléontologiques

## Formation de craie au Crétacé

**Craie** = accumulation de coccolithes  
(micro-algue à test carbonaté)

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



→ Climat tropical océanique

a. Certaines roches sédimentaires et leurs fossiles témoignent du climat local au moment de leur **formation** : Ce sont des indicateurs climatiques que l'on peut exploiter en appliquant le principe de l'**actualisme**.

- Bauxites et latérites, roches résultant d'une **altération** poussée en climat chaud et humide, témoignent d'un climat **tropical**

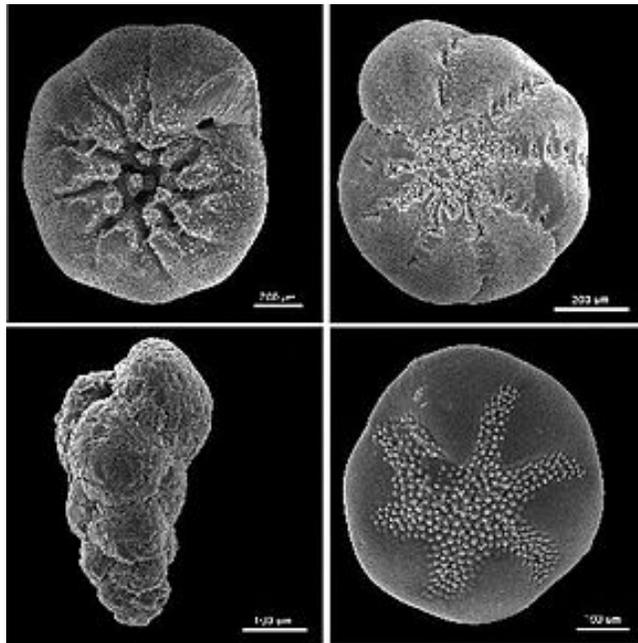
- Les **évaporites** sont des roches indicatrices d'un climat chaud et aride

- Les **tilites** témoignent de dépôts glaciaires caractéristiques d'un climat **froid**

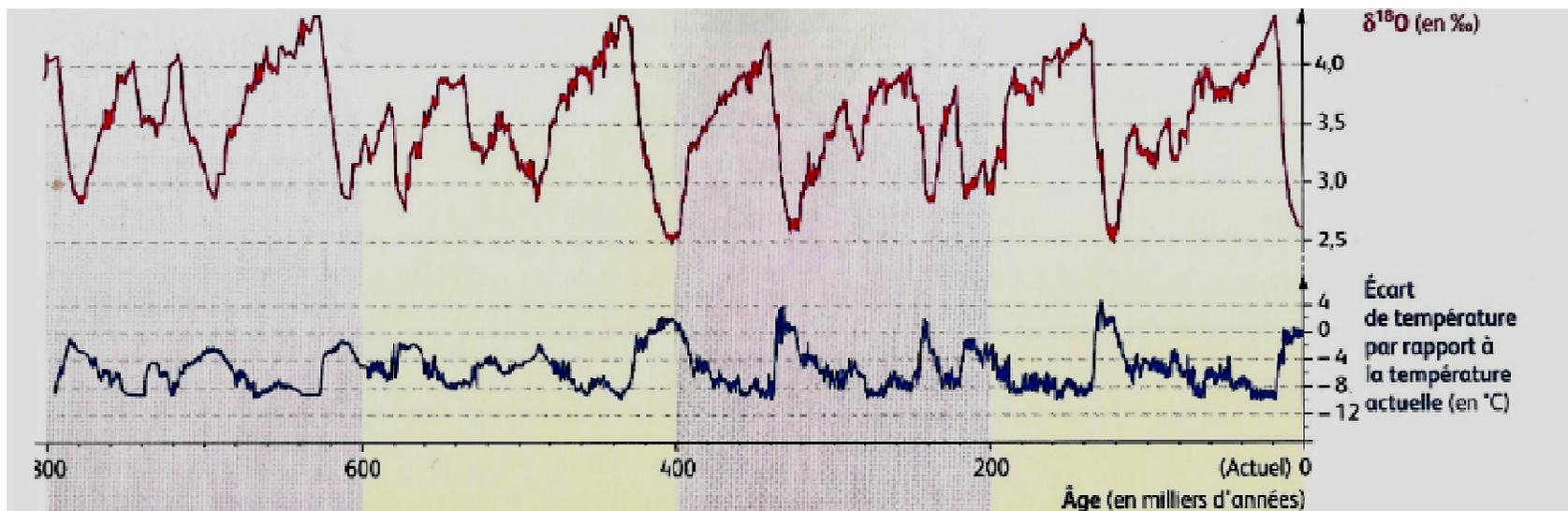
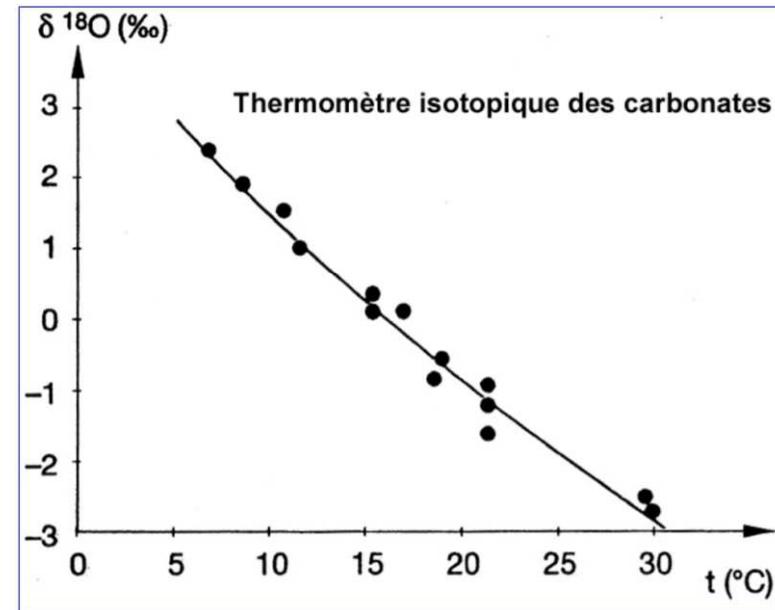
- L'étude de la répartition mondiale de ces indicateurs permet de reconstituer les grandes aires **climatiques** (tropicale, tempérée et polaire) et d'étudier les variations de leur **extension** latitudinale au cours des temps géologiques.

# dO18 des sédiments, un thermomètre isotopique

Foraminifères observés au MEB



Plus le dO18 est élevé, plus la température est basse



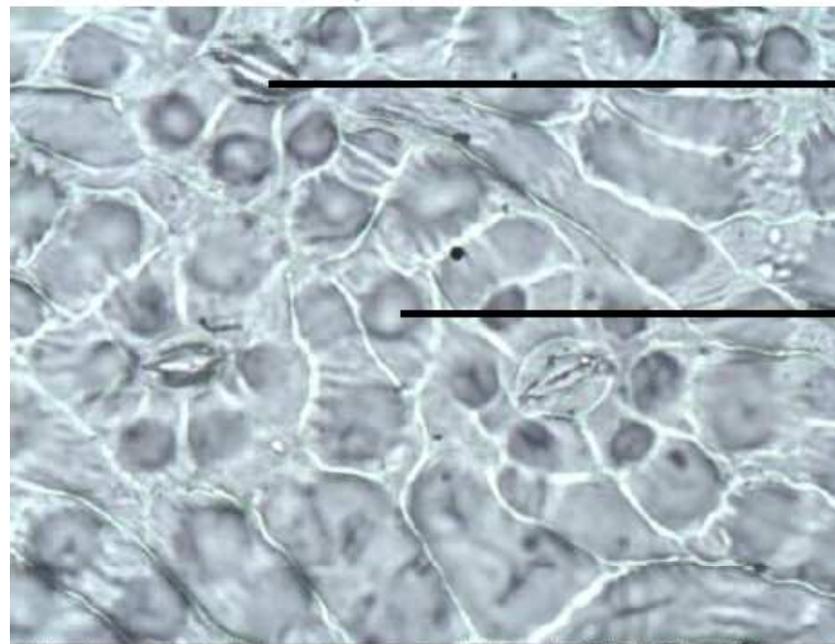
Composition isotopique des tests de foraminifères benthiques depuis 800 000 ans. La variation des températures déduite de l'étude des glaces antarctiques est rappelée au dessous. © Spécialité SVT Nathan 2012

b. Le **thermomètre** isotopique de la glace indique les variations de la température terrestre jusqu' à -800 000 ans, âge des plus vieilles **glaces**. Au-delà, on utilise le thermomètre isotopique benthique (isotopes contenus dans les **sédiments**).

# Indice stomatique et quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique

## Principe d'actualisme:

-On connaît certaines espèces qui ont peu évolué et chez lesquelles on a pu établir une corrélation entre le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique et l'indice stomatique (Ex: *Ginkgo biloba*)



cellule stomatique

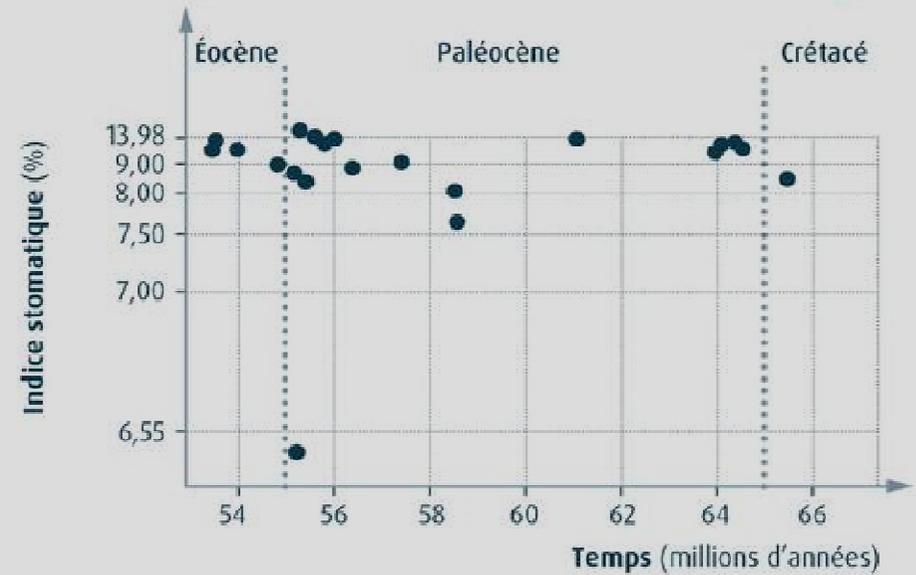
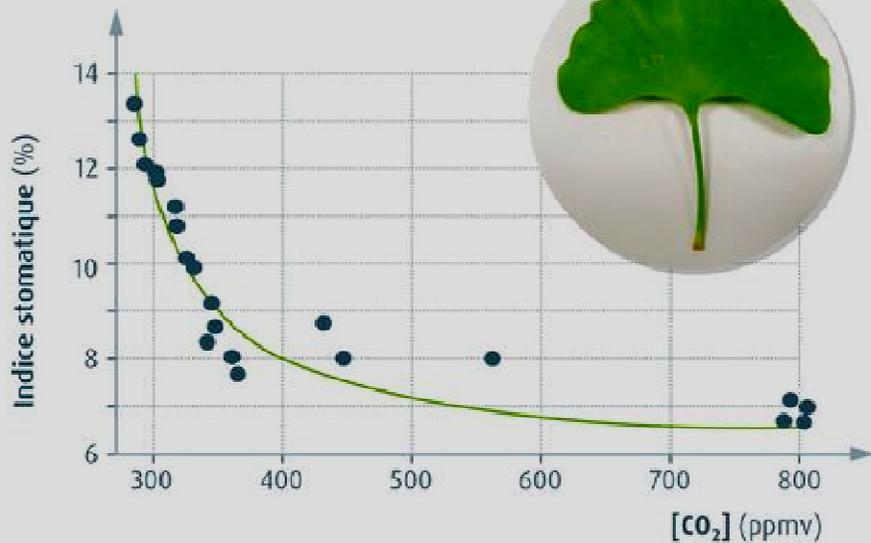
cellule épidermique

Microphotographie réalisée à partir d'une empreinte d'épiderme de feuille de *Ginkgo biloba* actuel

**Indice stomatique** = pourcentage de stomates dénombré sur la face inférieure de la feuille par rapport au nombre total de cellules épidermiques

Indice stomatique de feuilles de ginkgo actuel en fonction de [CO<sub>2</sub>]<sub>atm</sub>

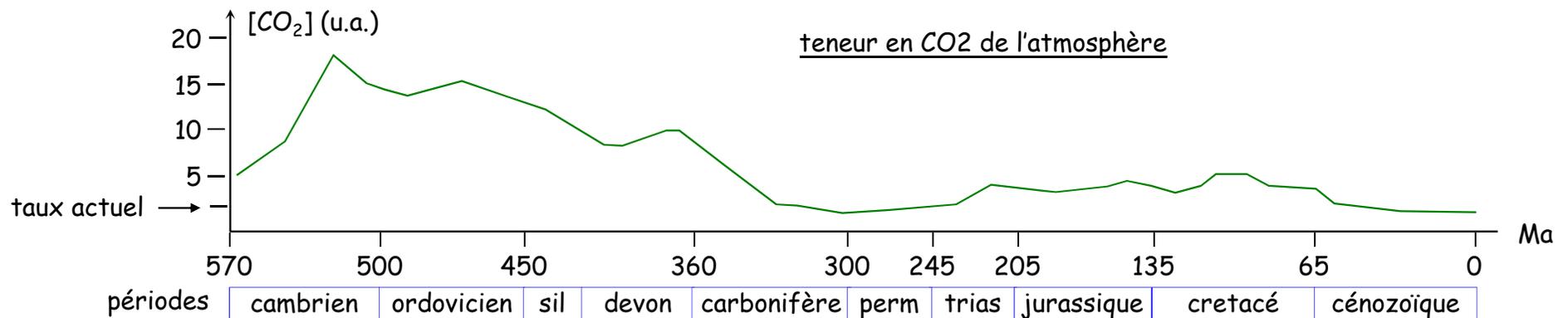
Indice stomatique mesuré sur des feuilles fossiles de ginkgo



## Actualisme

© Belin Éducation/Humensis, 2020 Manuel SVT Terminale spécialité  
© Thomas HAESSIG TESSIG

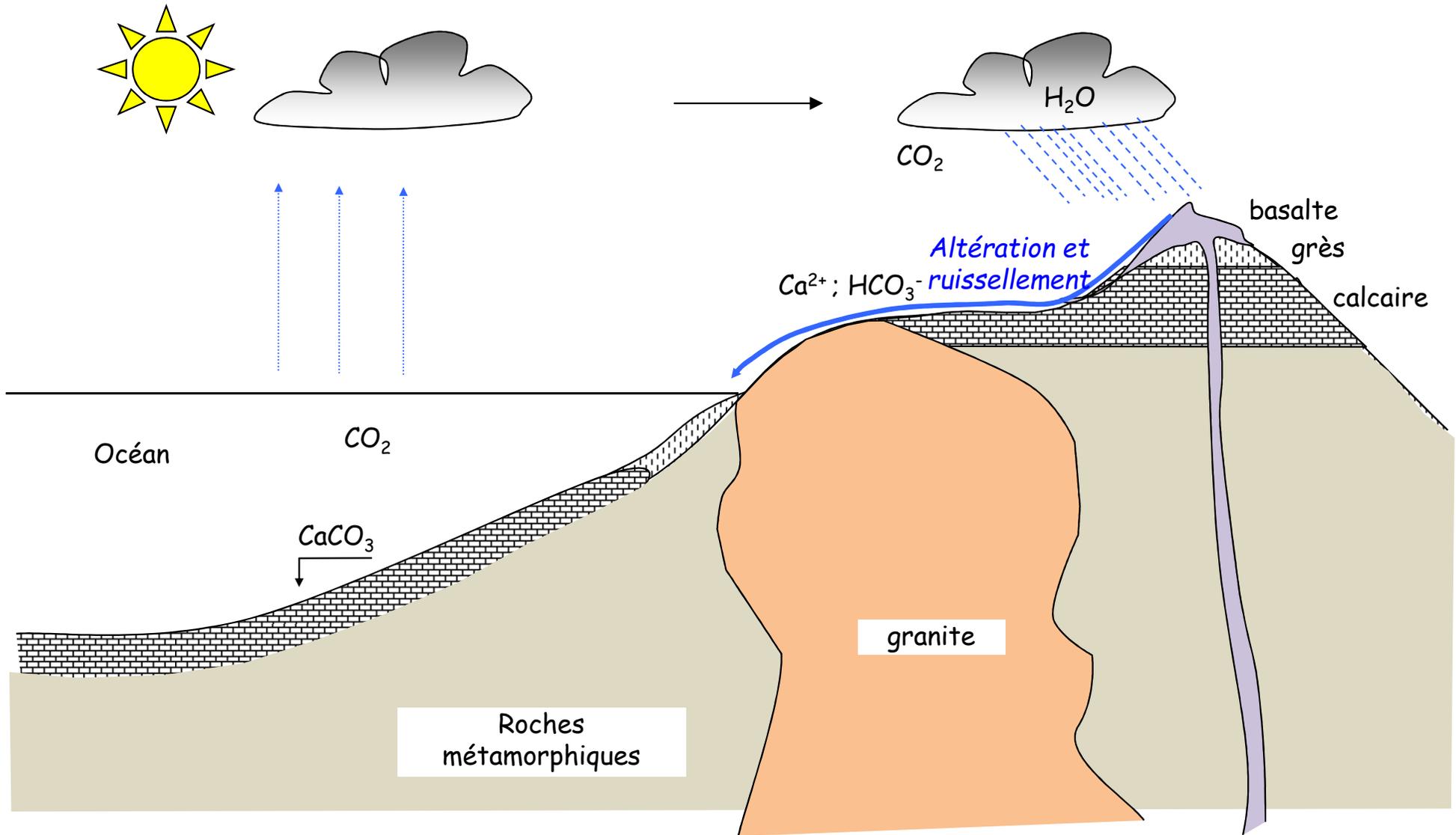
→ La mesure de l'indice stomatique de feuilles fossiles permet d'évaluer la quantité supposée de CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'époque où vivait le végétal



c. Concernant la teneur en CO<sub>2</sub> **atmosphérique**, différentes méthodes peuvent être combinées afin d'obtenir une estimation **indirecte**

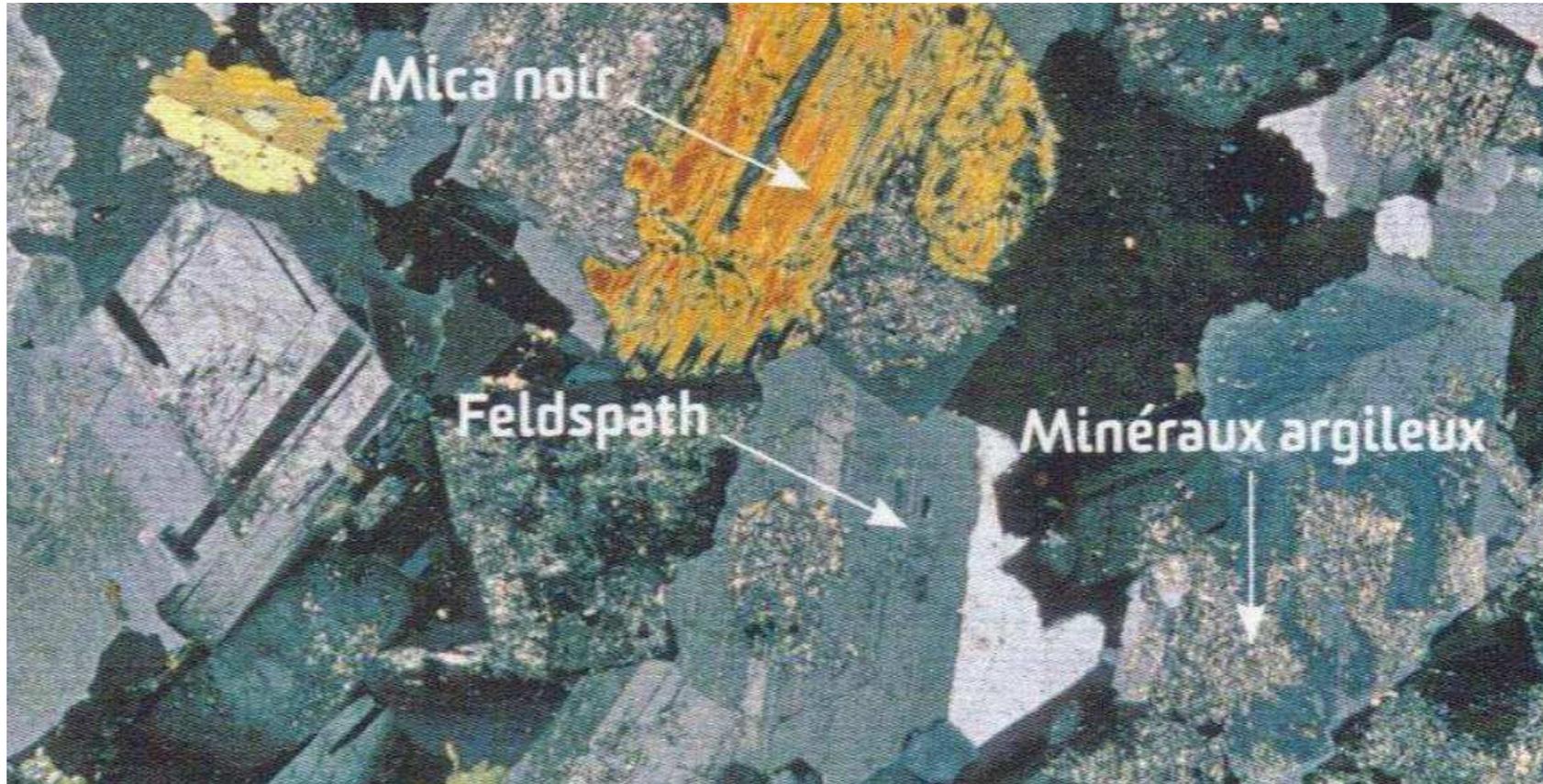
- L'**abondance** des stomates à la surface des feuilles fossiles est inversement **proportionnelle** à la quantité de CO<sub>2</sub> à l'époque

# Des échanges de C entre différents réservoirs



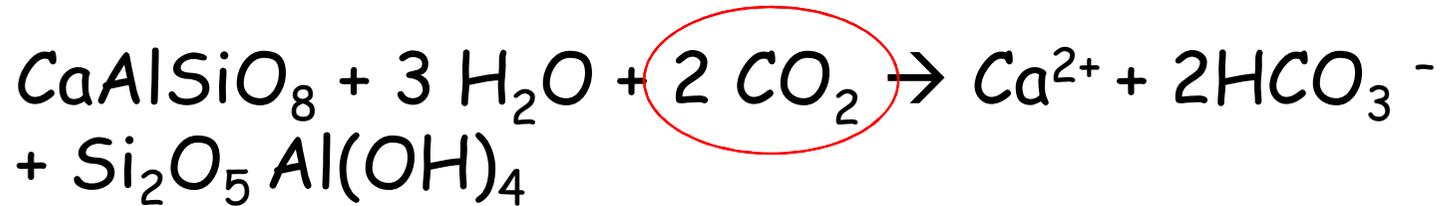
# L'érosion, une « pompe » à CO<sub>2</sub>

Lame mince de granite altéré observé au MO polarisant (LPA)

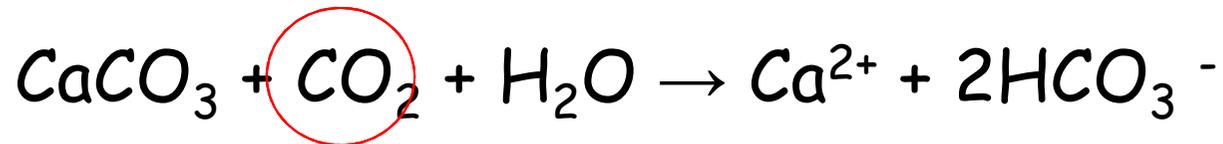


## L'érosion, une « pompe » à CO<sub>2</sub>

Altération d'un pyroxène calcique:



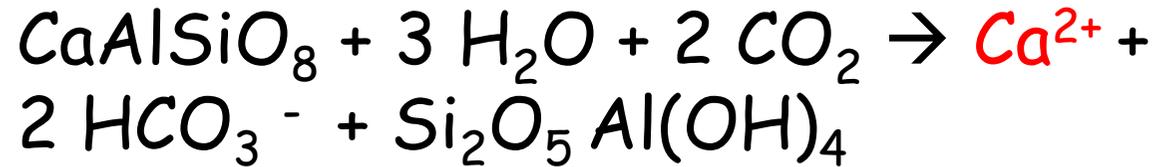
Dissolution du calcaire:



Il faut "consommer" 2 CO<sub>2</sub> atmosphériques pour mettre en solution 1 Ca<sup>2+</sup>, alors que la dissolution des calcaires ne consomme qu'un seul CO<sub>2</sub> atmosphérique.

## L'érosion, une « pompe » à CO<sub>2</sub>

Altération d'un pyroxène calcique:



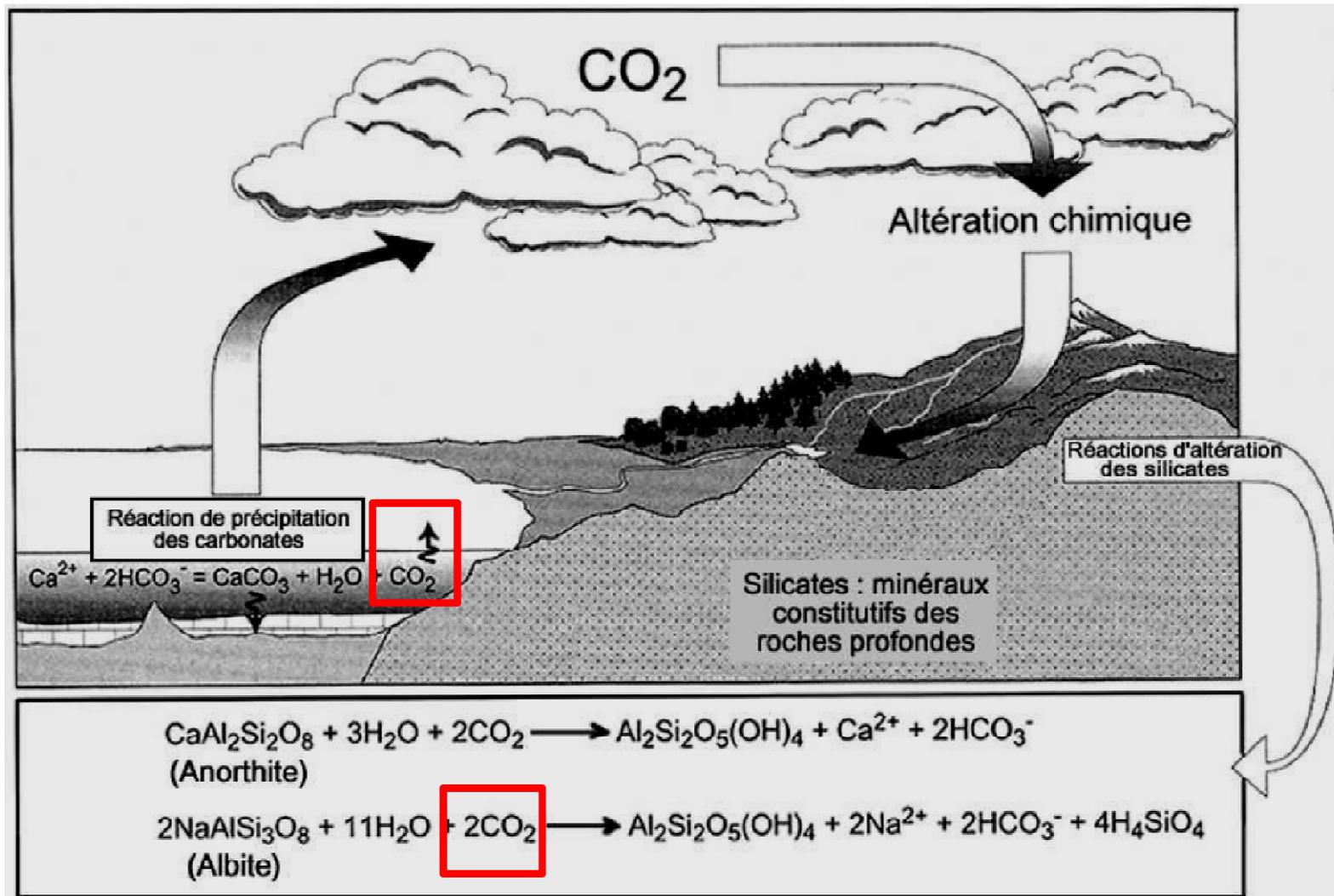
Précipitation du calcaire:



L'altération du pyroxène consomme 2 CO<sub>2</sub> pour 2 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et 1 Ca<sup>2+</sup>. La précipitation d'autant de Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ne libère qu'1 CO<sub>2</sub>.

L'ensemble de ces processus pompe donc 1 CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pour le fixer en CaCO<sub>3</sub>

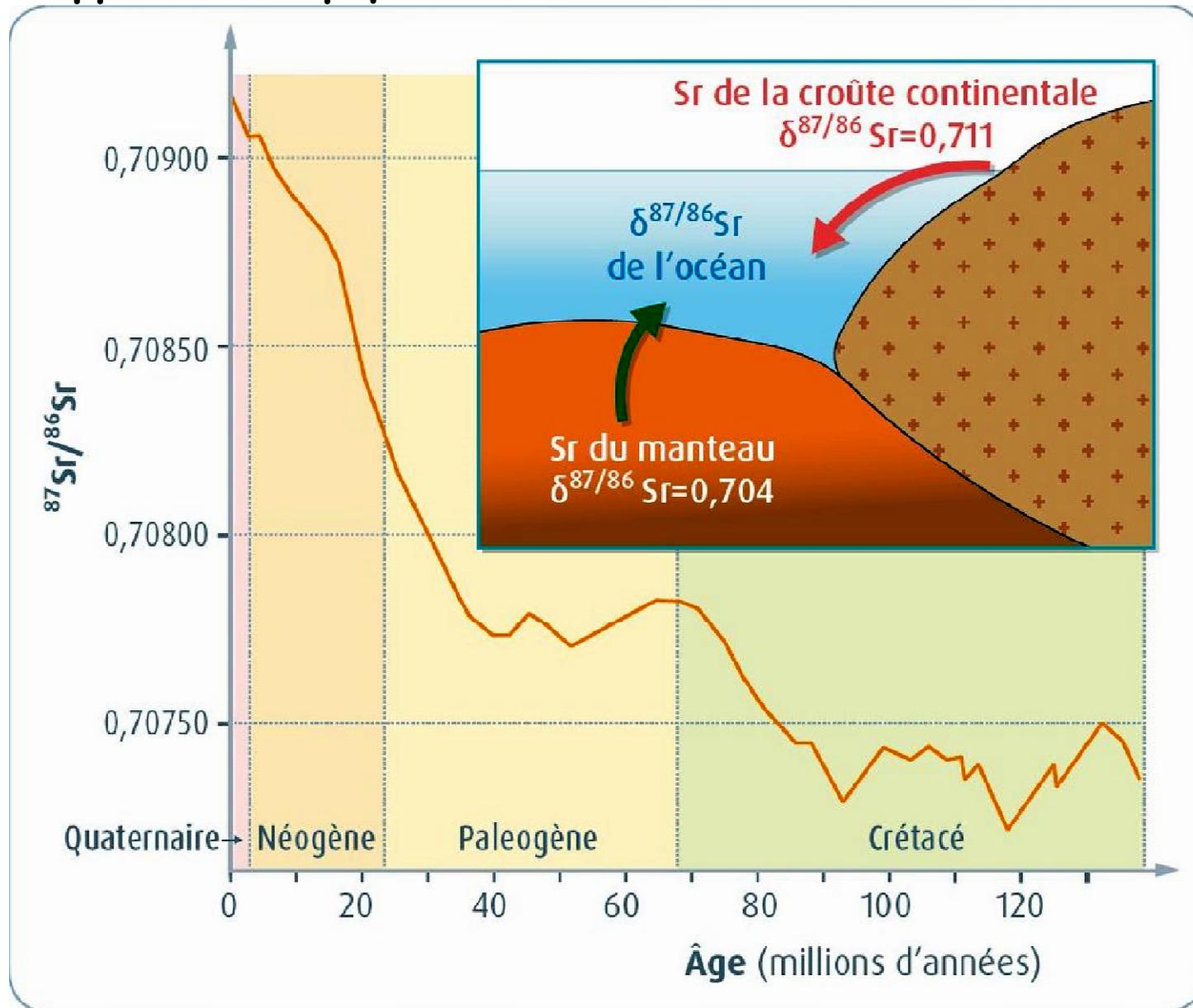
## Schéma 2 : Processus d'altération des silicates et conséquence sur le cycle biogéochimique du carbone



*L'anorthite et l'albite sont deux minéraux silicatés de la maille des feldspaths, très abondants au niveau de la croûte continentale*

# Des rapports isotopiques indicateurs d'une intensité de l'altération

p. 293 et +



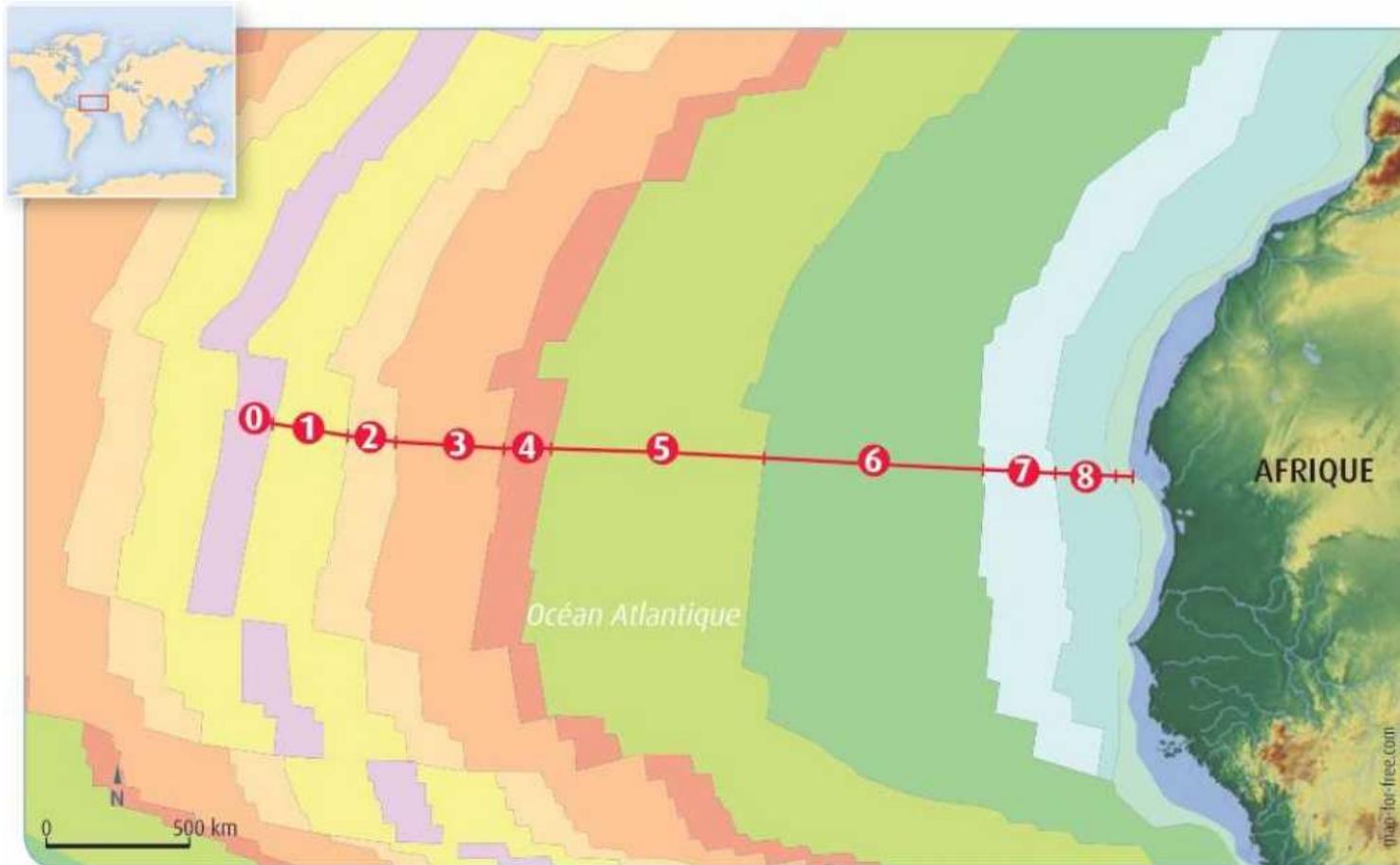
© Belin Éducation/Imensis, 2020 Manuel SVT terminale spécialité  
© Thomas HAESSIG TESSIG

L'augmentation de l'altération des reliefs continentaux lors des orogénèses augmente le rapport isotopique des carbonates océaniques. Les isotopes  $^{86}\text{Sr}$  et  $^{87}\text{Sr}$  du strontium sont intégrés à la place du calcium lors de la formation des calcaires. Ils sont apportés aux océans par les sources hydrothermales et par l'altération des continents.

- L'étude des roches détritiques et sédimentaires nous renseigne sur l'importance de l'altération chimique des roches continentales (processus qui consomme du  $\text{CO}_2$  et donc réduit l'effet de serre)

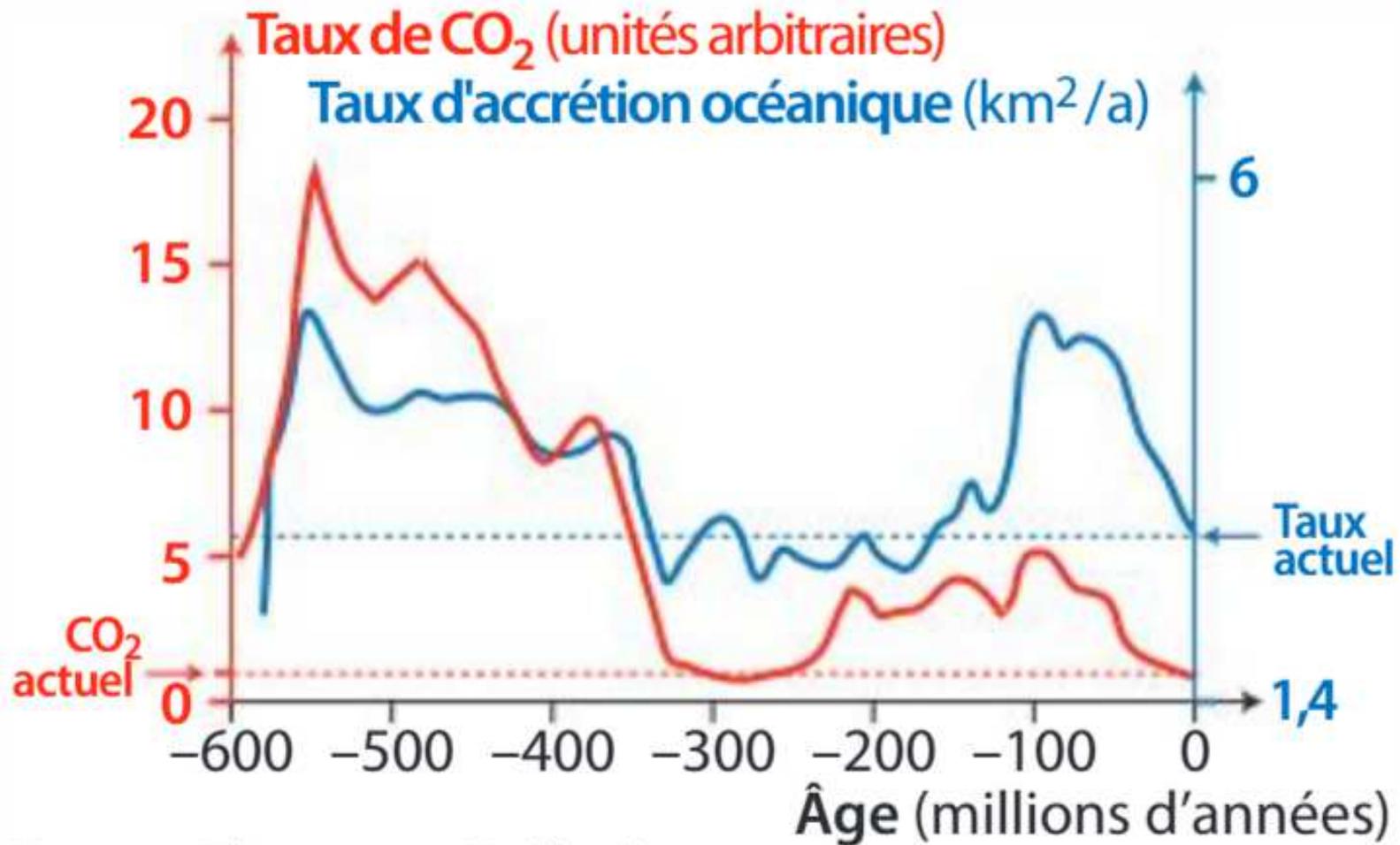
# Age des fonds océaniques de l'Atlantique au large de l'Afrique

p. 325



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

## Corrélation vitesse d'expansion océanique / taux de CO<sub>2</sub>



Source : Thomas et Gaillardet

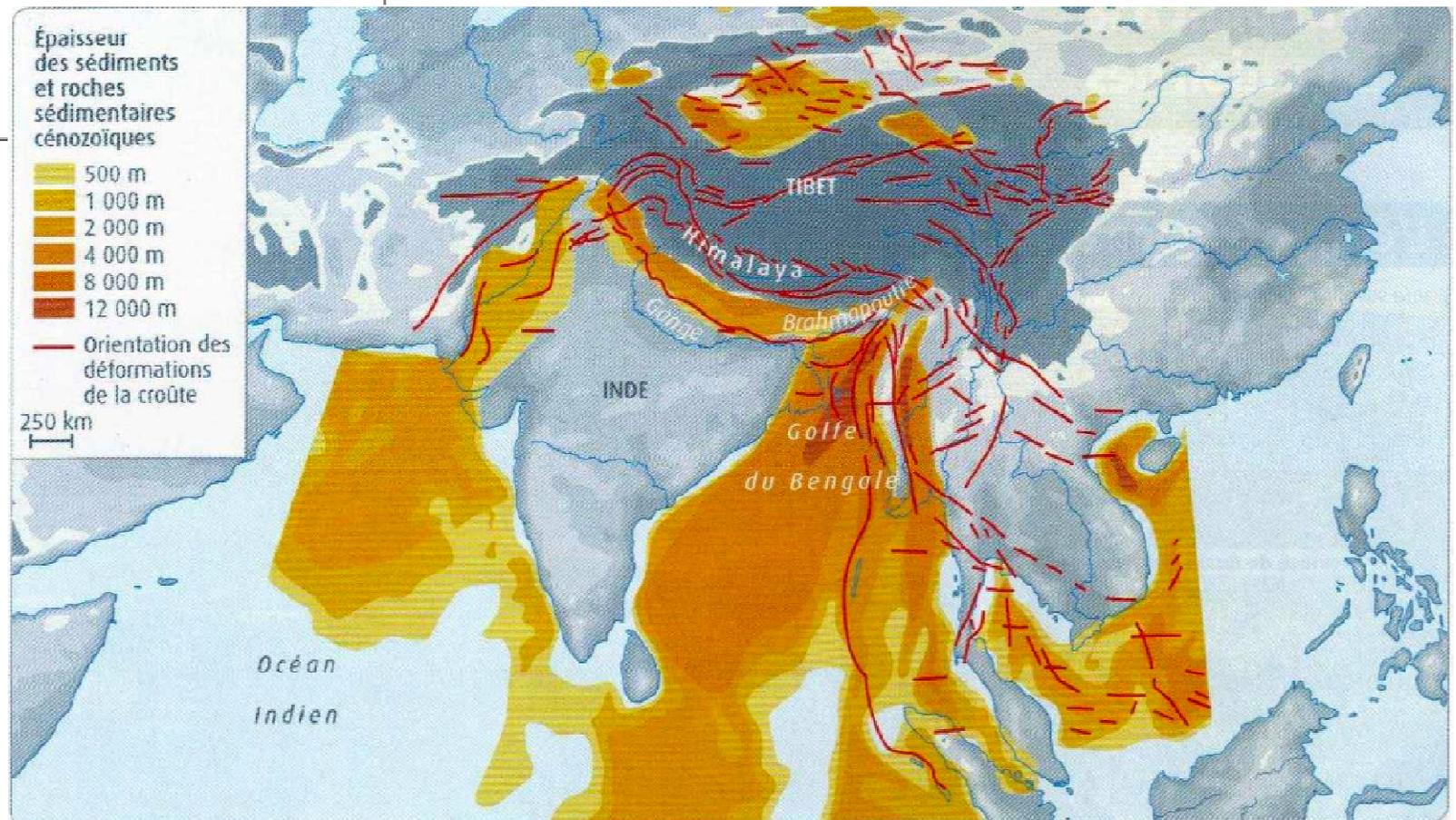
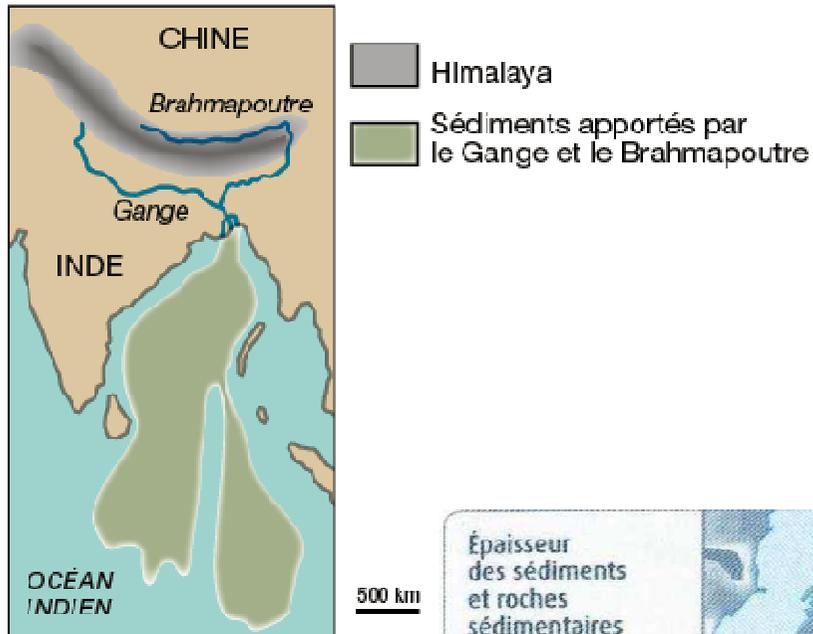
- La reconstitution des vitesses d'**expansion** des fonds océaniques permet d'estimer les quantités de CO<sub>2</sub> libérés par l'activité **magmatique** des dorsales (plus les dorsales sont actives, plus la quantité de CO<sub>2</sub> produite est importante)

2. Au Cénozoïque (de -65 MA à l'actuel) de nombreux indices révèlent un **refroidissement** global progressif depuis -30 MA aboutissant aux glaciations du quaternaire.

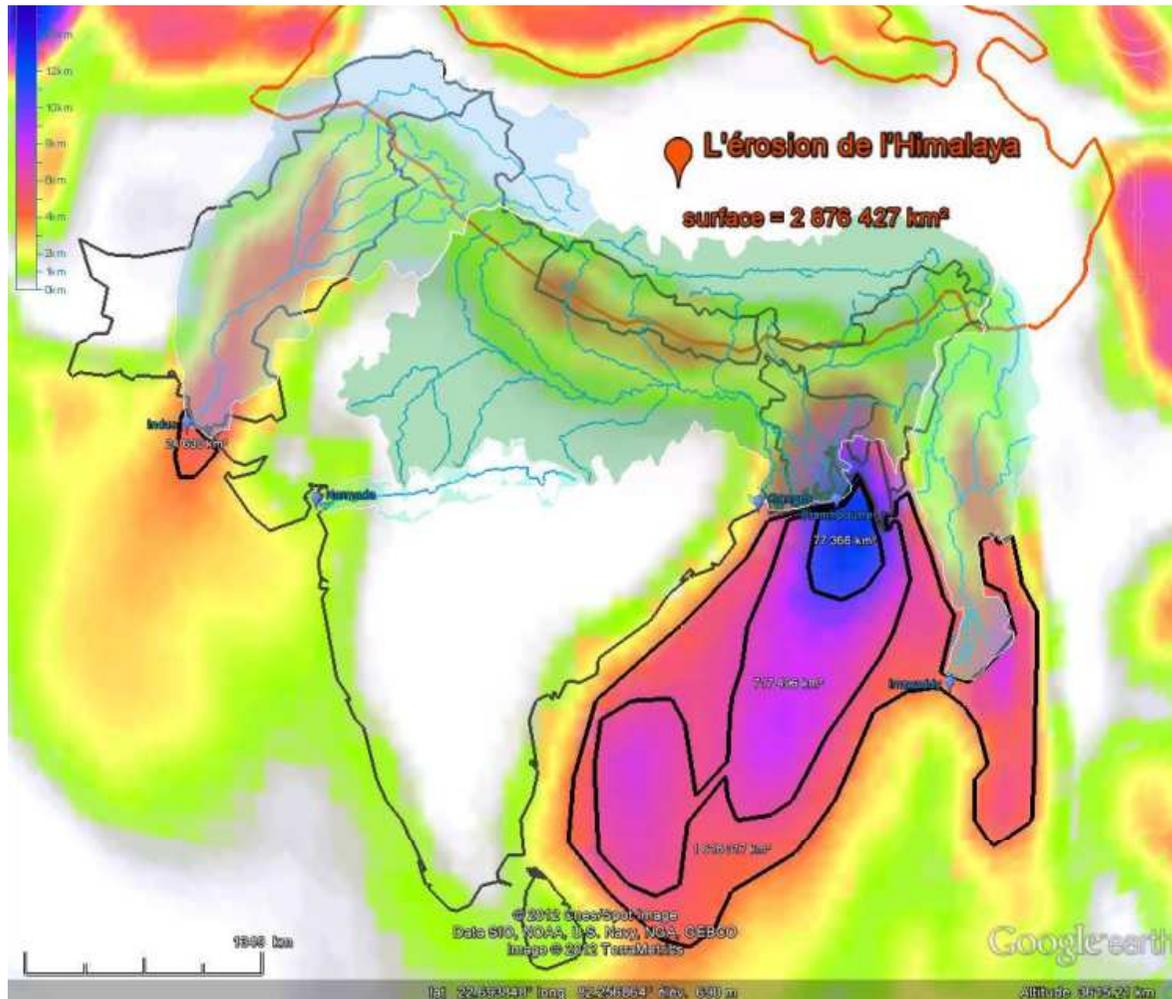
L'altération chimique de grandes chaînes de montagne **piégeant** le CO<sub>2</sub> (Alpes, Himalaya) et des modifications de **circulations** océaniques liées à la tectonique des plaques seraient en grande partie responsables de ce refroidissement.



# Estimation de la masse de sédiments issus de l'érosion depuis 65 MA



## Exemple d'estimation du taux d'érosion



### Volume des sédiments :

- dont l'épaisseur dépasse 4 km :  $(1\,618\,317 + 24\,630) \text{ km}^2 * 4 \text{ km} = 6\,571\,788 \text{ km}^3$

- dont l'épaisseur dépasse 8 km :  $717\,496 \text{ km}^2 * 4 \text{ km} (8-4) = 2\,869\,984 \text{ km}^3$

- dont l'épaisseur dépasse 12 km :  $77\,366 \text{ km}^2 * 4 \text{ km} (12-8) = 309\,464 \text{ km}^3$

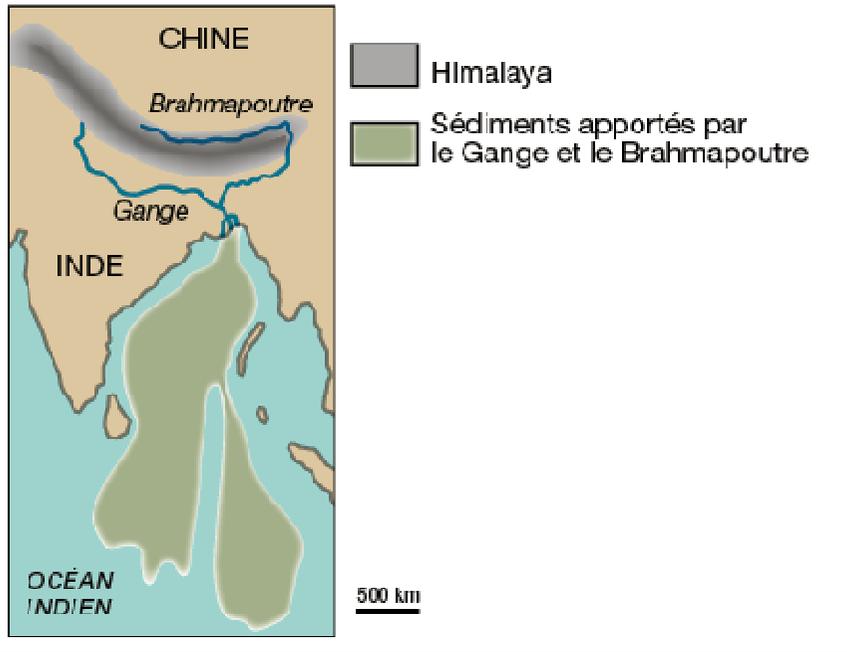
**Volume total** =  $6\,571\,788 + 2\,869\,984 + 309\,464 = 9\,751\,236 \text{ km}^3$

Sachant que la **surface de l'Himalaya** représente  $2\,816\,427 \text{ km}^2$ , l'épaisseur des roches supprimées par l'érosion est de  $9\,751\,236 \text{ km}^3 / 2\,816\,427 \text{ km}^2 = 3,44 \text{ km}$ .

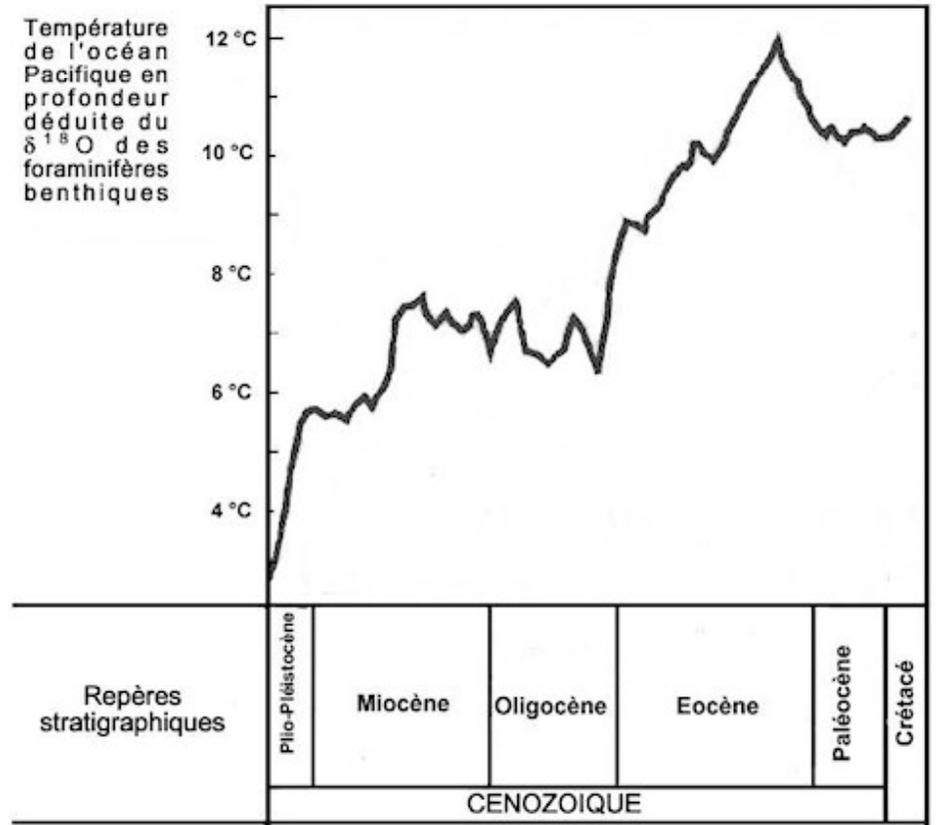
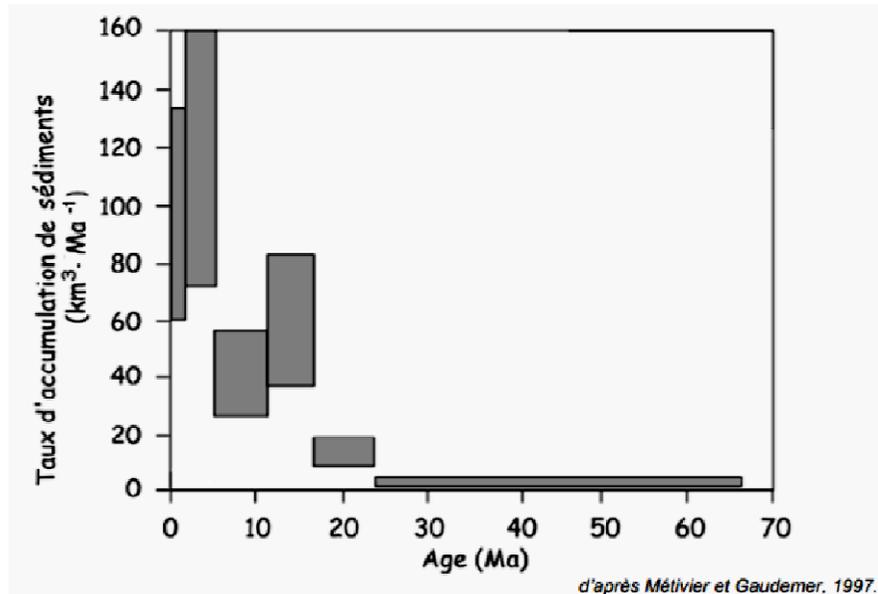
L'érosion **moyenne** depuis 50 Ma est de  $3,44 / 50.106 = 6,89.10^{-8} \text{ km} = 0,069 \text{ mm/an}$

<http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/terre/himalaya/kmz-himalaya>

# Estimation de la masse de sédiments issus de l'érosion depuis 65 MA



Variation du taux d'accumulation des sédiments dans le bassin du Tarim au cours du temps



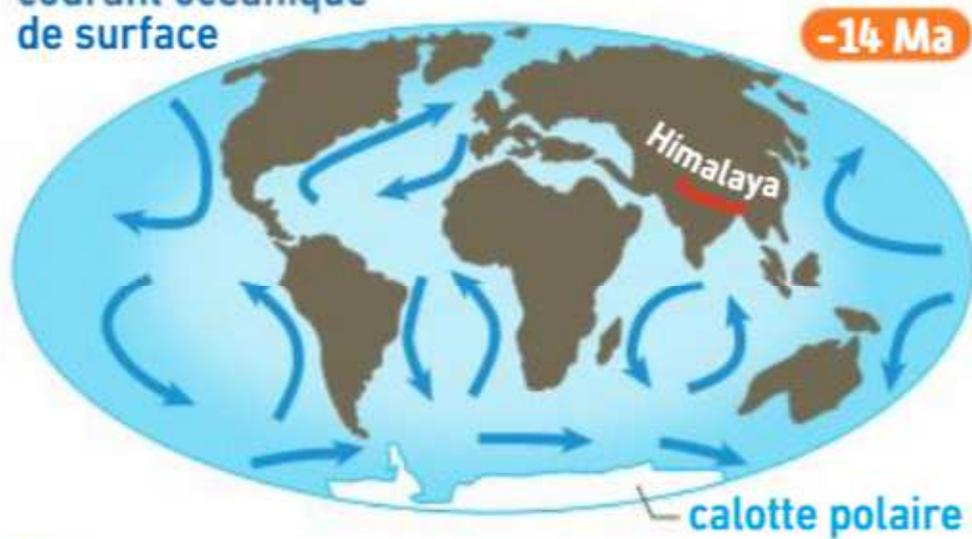
a. Lien entre tectonique des plaques et cycle géochimique du carbone :

- Les orogénèses provoquées par la **réunion** de blocs continentaux ont donné naissance à des chaînes de montagne (**Alpes, Himalaya**)
- L'altération chimique des minéraux qui accompagne l'**érosion** des chaînes de montagnes se traduit par une **diminution** de la teneur atmosphérique en  $CO_2$  (voir schéma 2 : la réaction d'altération consomme 2  $CO_2$ , tandis que la formation des sédiments carbonatés ne libère que 1  $CO_2$ )
- Ainsi la diminution du  $CO_2$  atmosphérique, donc de l'effet de serre expliquerait le refroidissement.

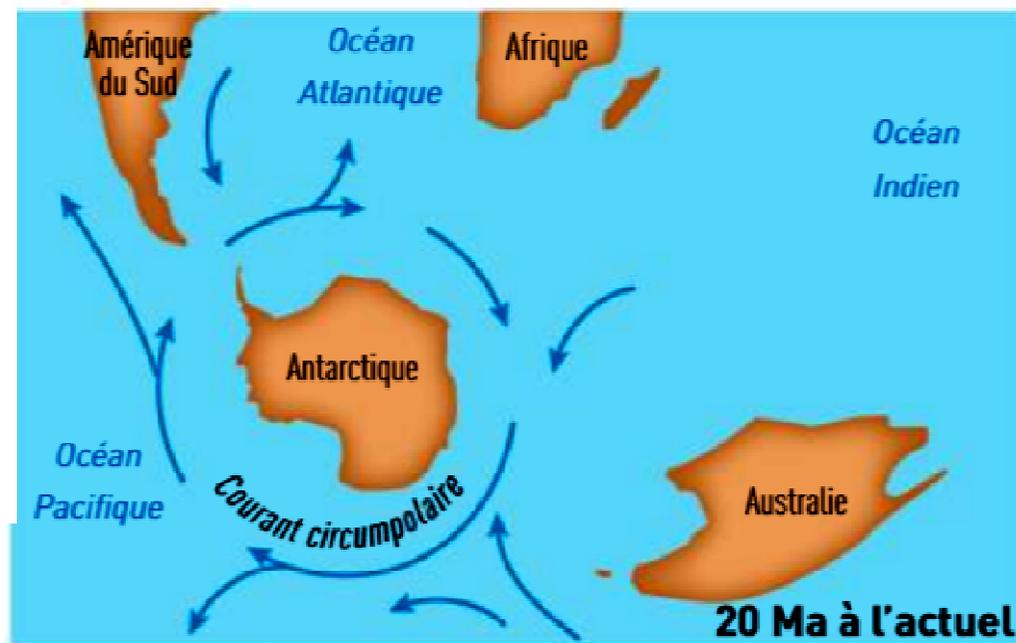
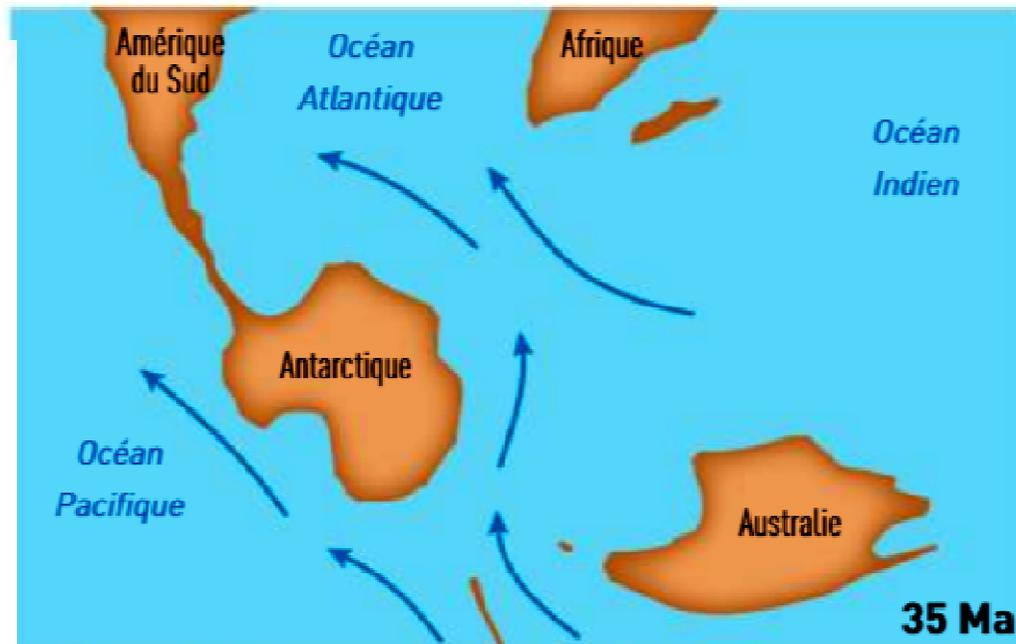
# Cénozoïque: Modifications des circulations océaniques



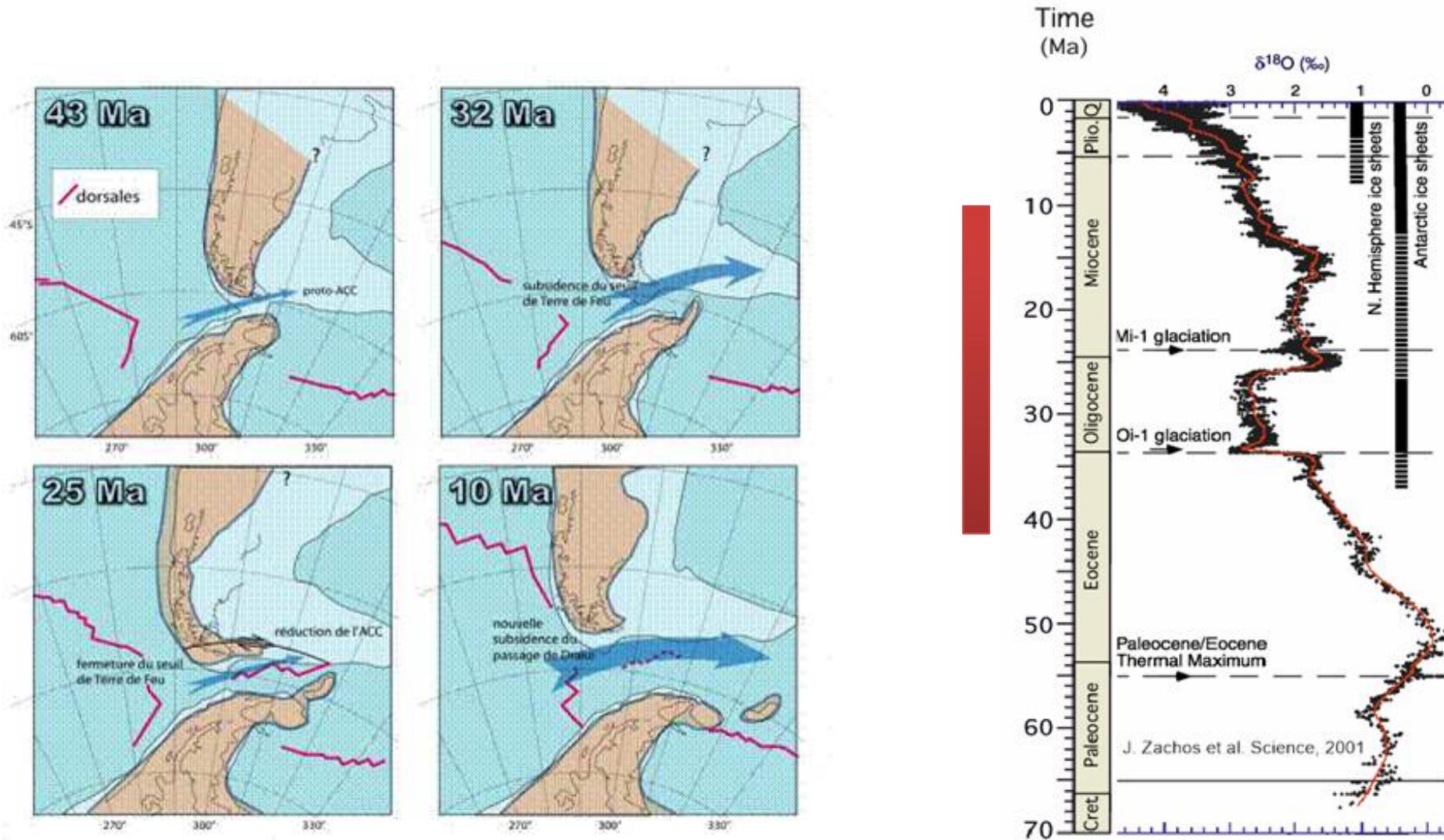
→  
courant océanique  
de surface



calotte polaire

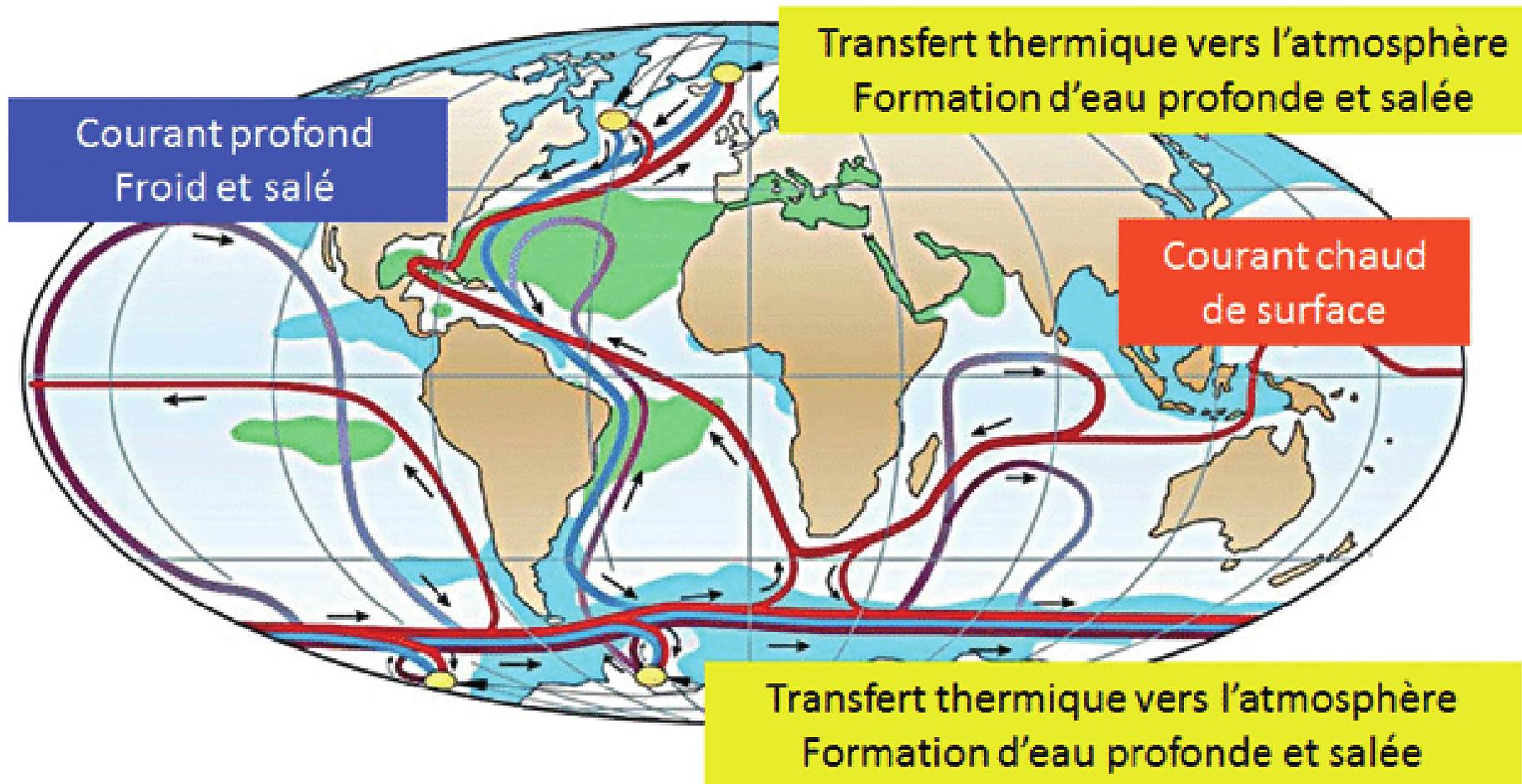


# Cénozoïque: Modifications des circulations océaniques



Dans le cadre du programme Relief (de l'Institut National des Sciences de l'Univers), **Y. Lagabrielle et al. 2009** ont montré que l'ouverture du passage de Drake coïncide remarquablement avec le refroidissement climatique du Tertiaire. Il se situe entre 43 Ma. et 10 Ma., date de la fin de la séparation de l'Antarctique et de l'Amérique du Sud.

# Circulation thermohaline actuelle

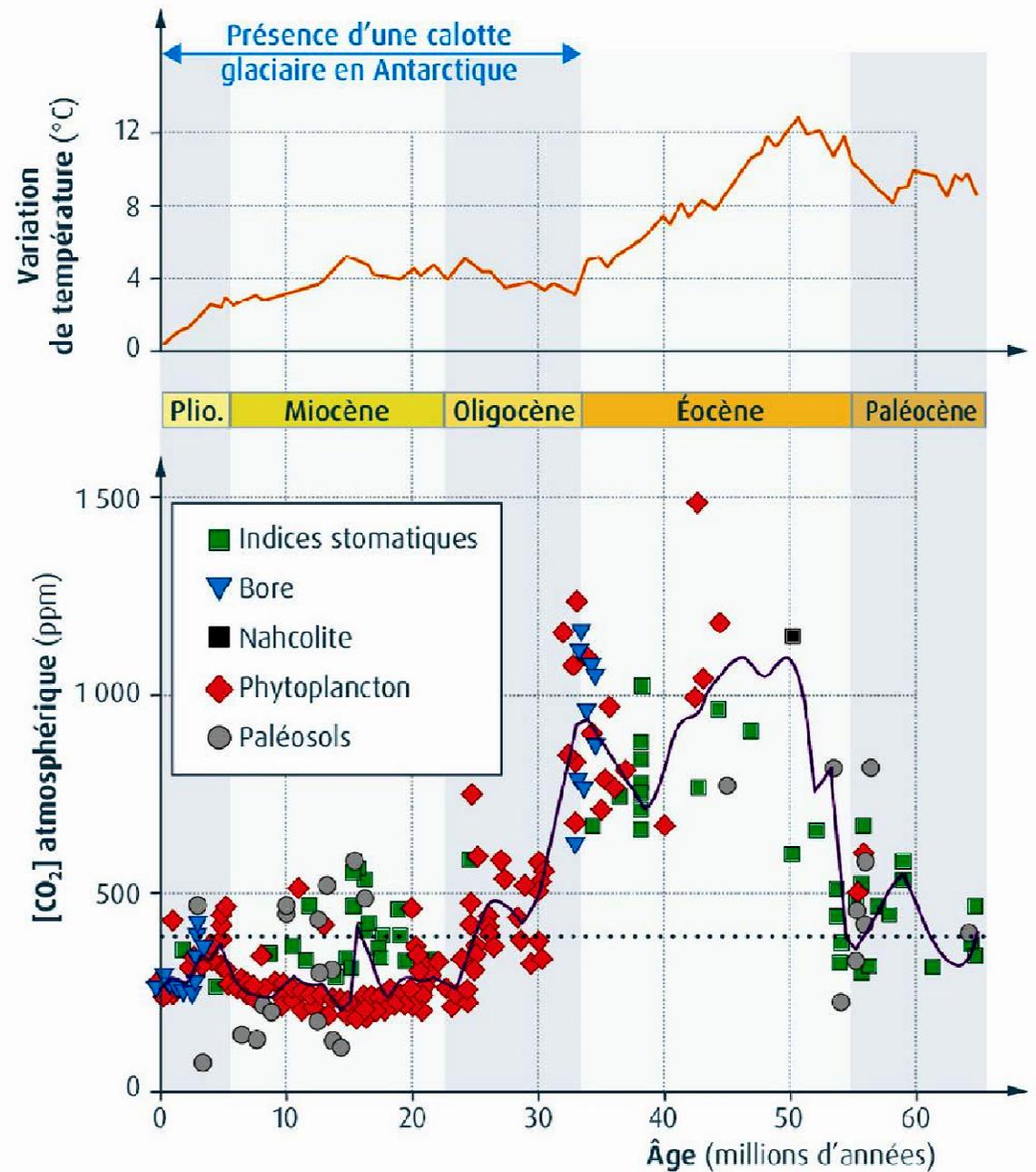


## Cénozoïque: Synthèse de différents indices

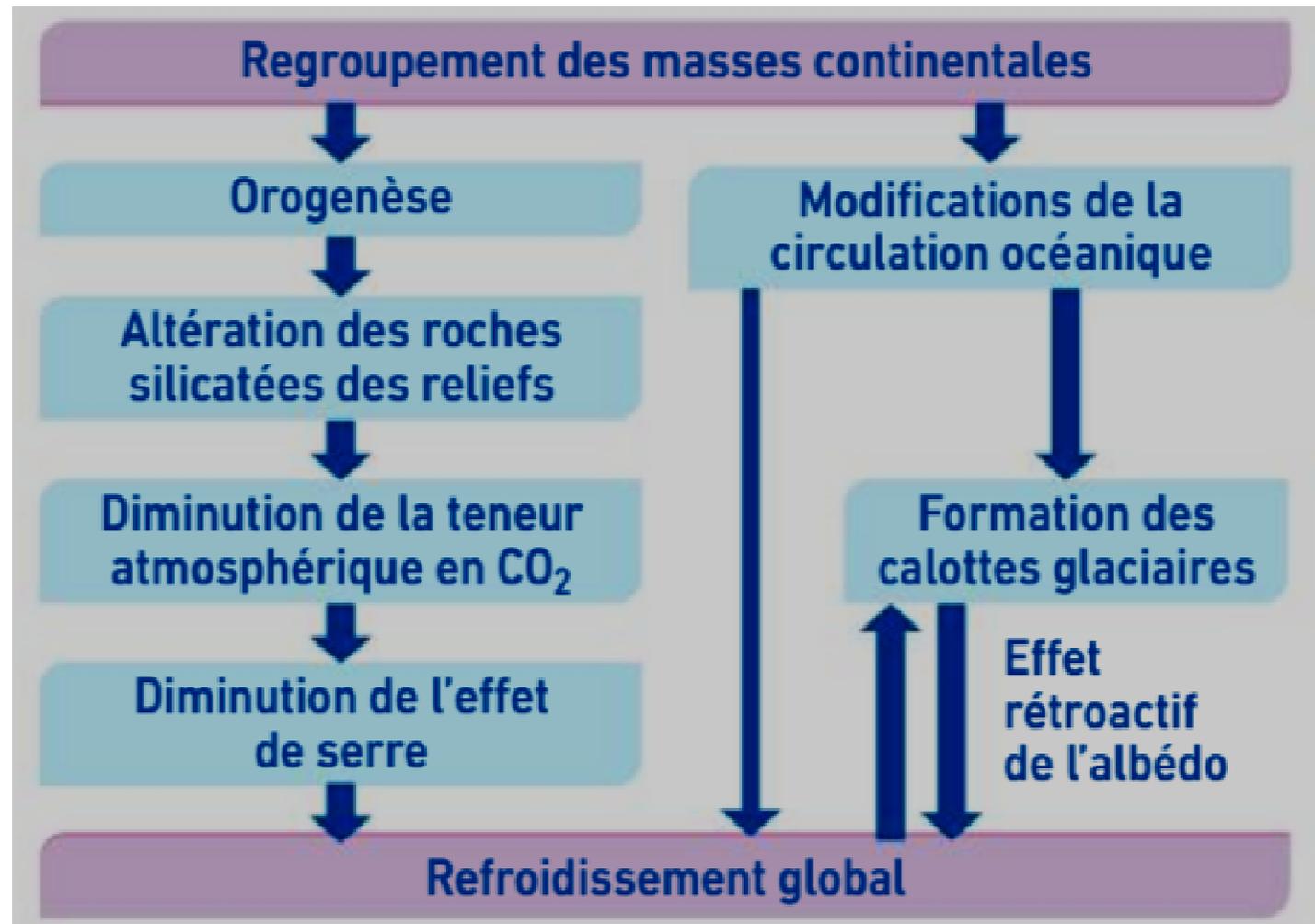
**Bore.** Le rapport isotopique dans les carbonates permet de connaître le pH de l'eau et donc indirectement la teneur atmosphérique en  $CO_2$ .

**Nahcolites** = carbonates ( $NaHCO_3$ ) qui précipitent dans des conditions de climat chaud et de concentration atmosphérique en  $CO_2$  très élevée.

**Phytoplancton** = Microorganismes photosynthétiques produisant de la matière organique qui peut être piégée dans les sédiments. La photosynthèse « pompe » préférentiellement le  $^{12}CO_2$  par rapport au  $^{13}CO_2$ . La mesure du rapport entre  $^{12}C$  et  $^{13}C$  dans les sédiments permet de déduire des variations de l'intensité photosynthétique, elle-même corrélée aux variations de la teneur atmosphérique en  $CO_2$



### Schéma 3 : Mécanismes susceptibles d'expliquer le refroidissement au cours du Cénozoïque

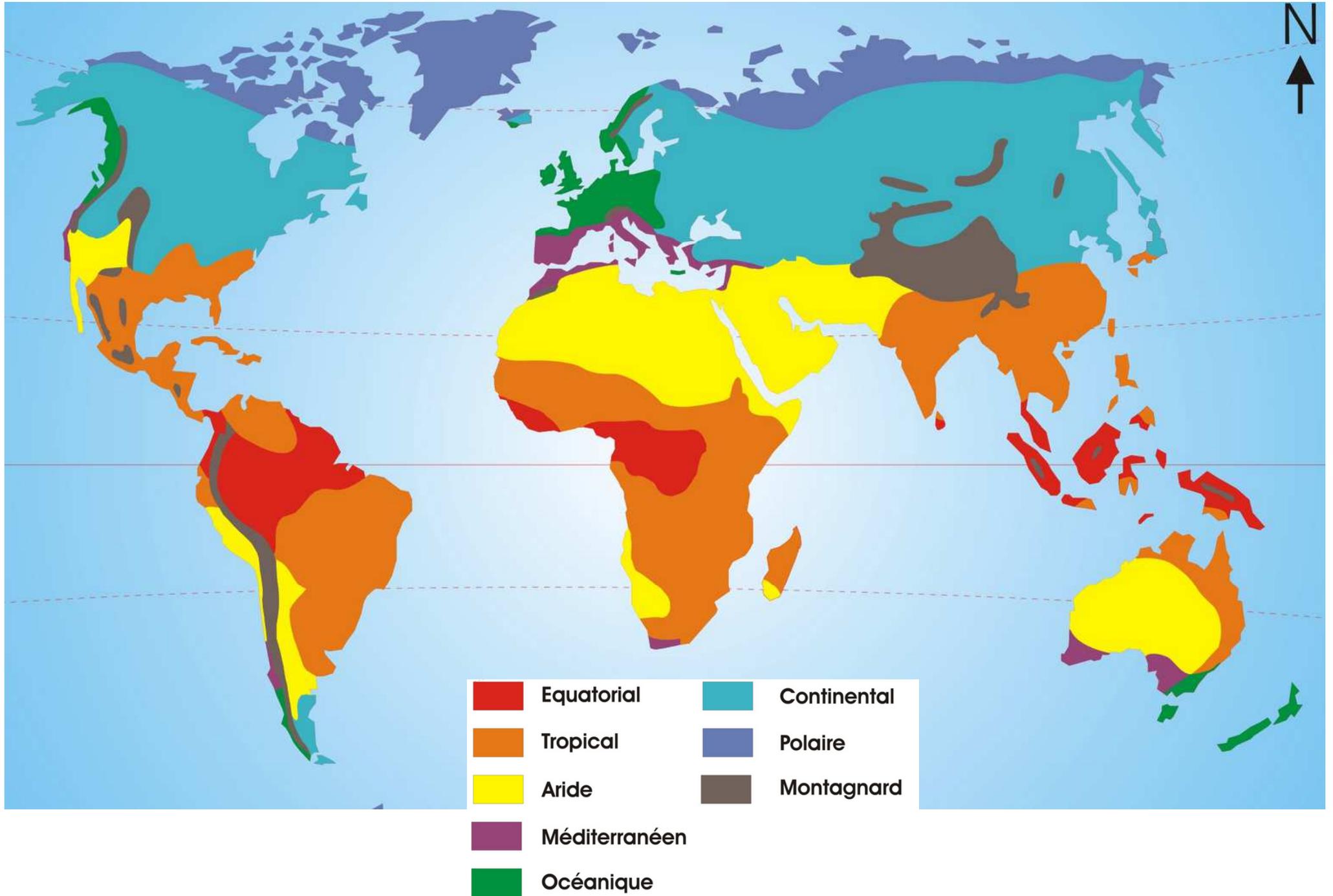


b. Lien entre tectonique des plaques et modification des circulations océaniques :

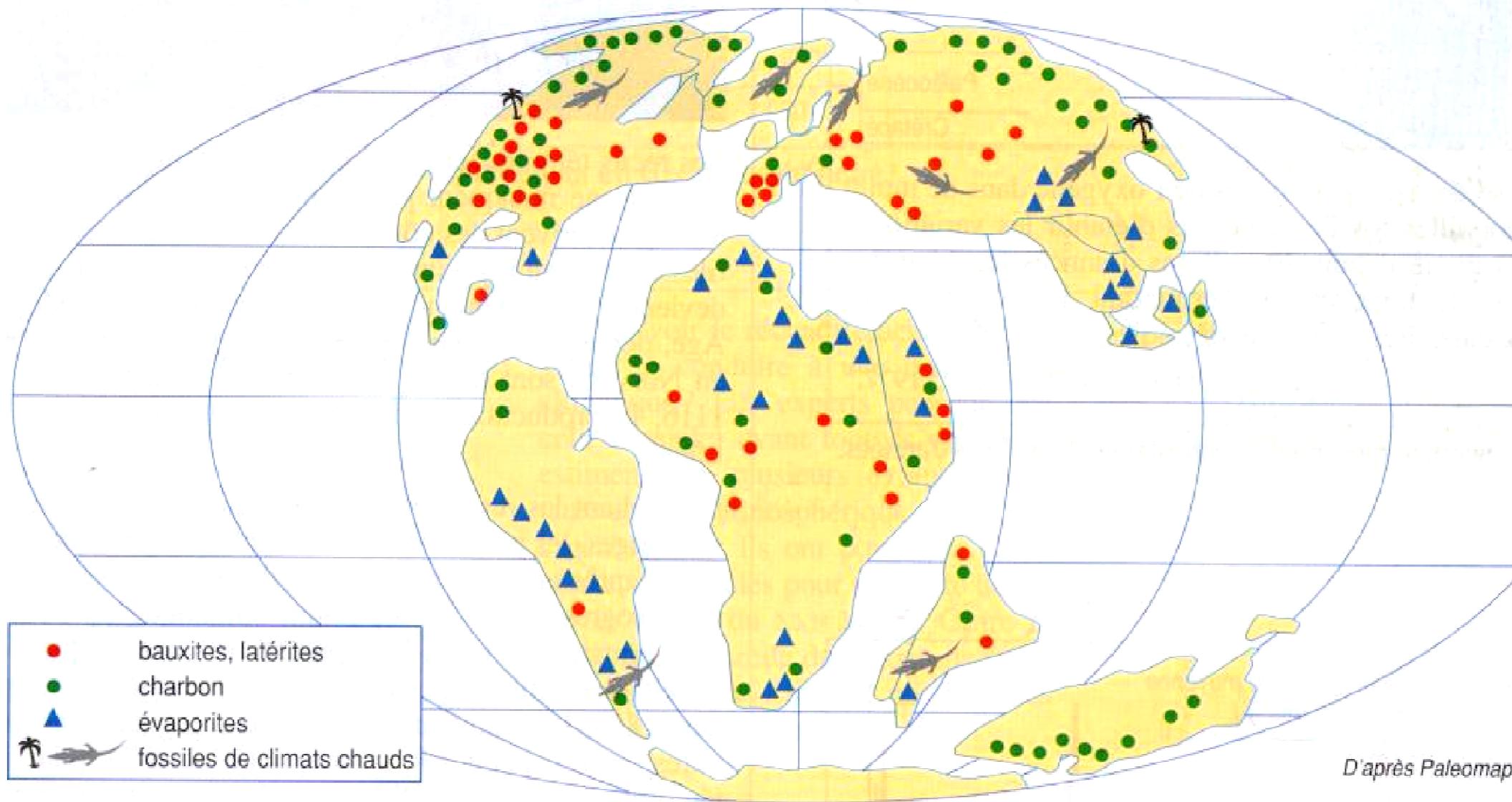
- La fermeture d'un vaste domaine océanique centré sur l'équateur aurait provoqué la disparition d'un courant intertropical faisant le tour du globe et **favorisant** un climat globalement chaud
- L'isolement du continent Antarctique aurait permis l'installation d'un courant froid circumpolaire (autour de l'Antarctique) favorisant la formation d'une **calotte** polaire au Sud à partir de - 30 MA (donc **augmentation** de l'albédo, donc refroidissement accentué)
- L'installation de la circulation thermohaline (courants de direction Nord-Sud) aurait accentué des **différences** de température selon la latitude, favorable à l'installation d'un refroidissement global.

**3. Au Mésozoïque (-251 à -65 MA) de nombreux indices révèlent que le Crétacé était une période très chaude de l'histoire de la Terre**

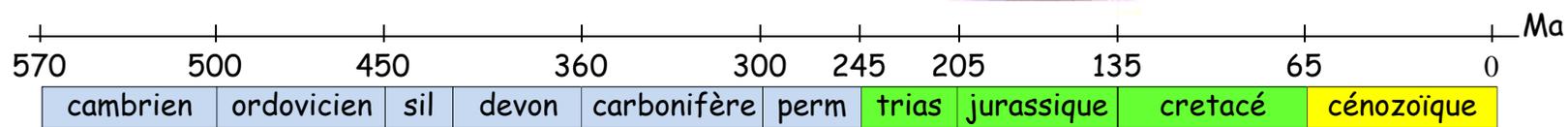
# Zones climatiques actuelles



# Localisation et nature des roches datées du crétacé



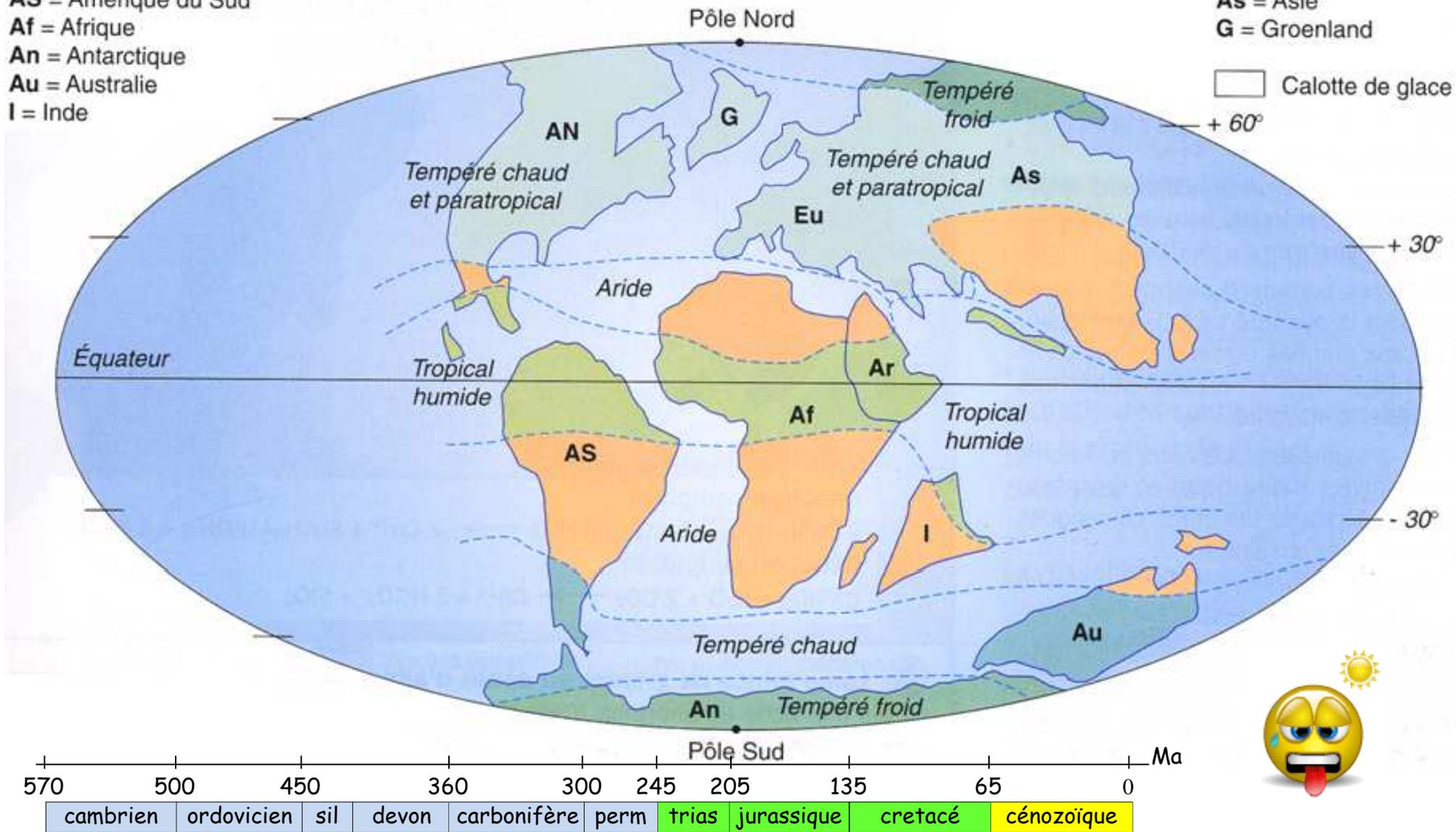
*D'après Paleomap*

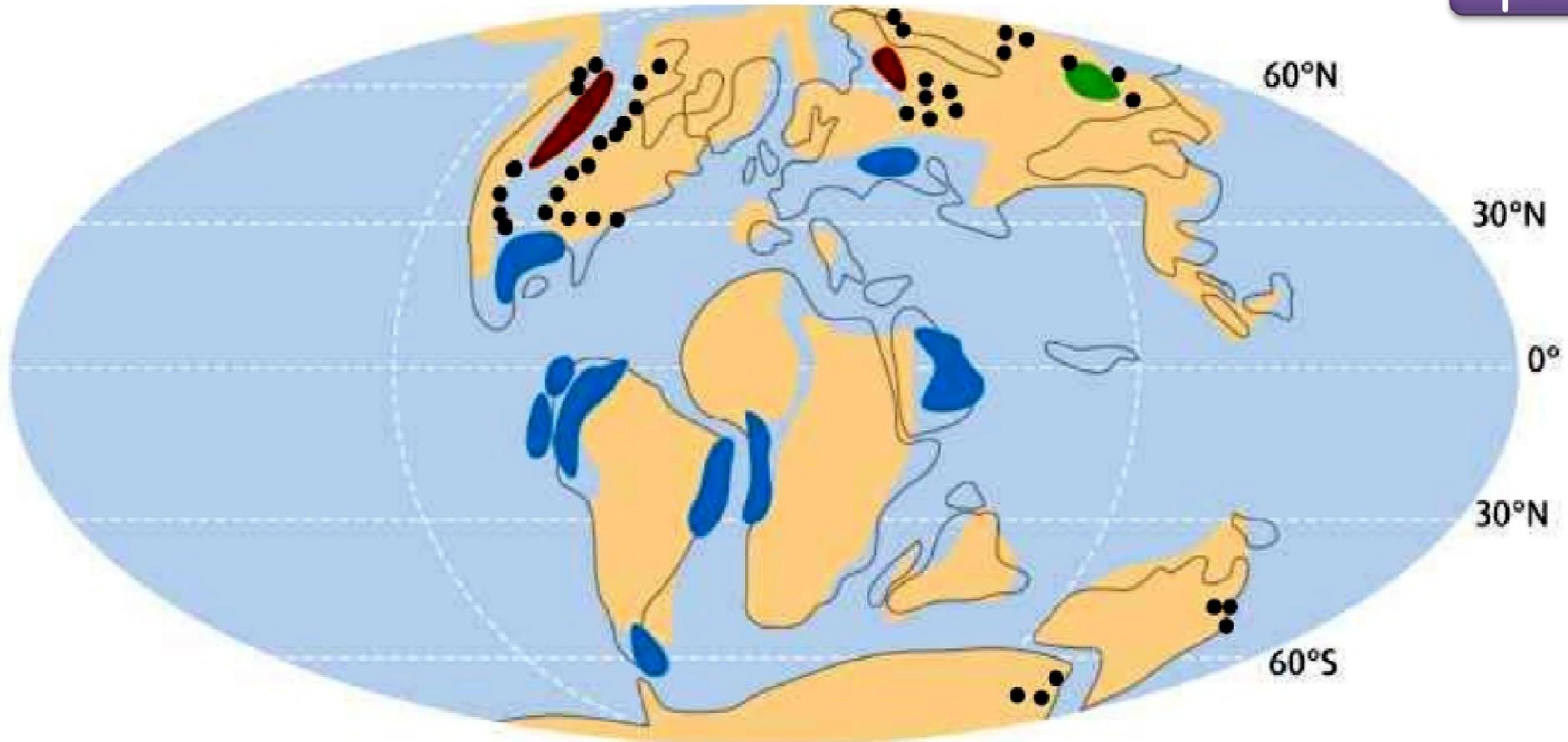


# Répartition des continents et zones climatiques au crétacé supérieur -80 Ma

AN = Amérique du Nord  
 AS = Amérique du Sud  
 Af = Afrique  
 An = Antarctique  
 Au = Australie  
 I = Inde

Ar = Arabie  
 Eu = Europe  
 As = Asie  
 G = Groenland  
 ☐ Calotte de glace





**Gisement de pétrole  
et origine de leur matière organique**

**■ lacustre ■ marine ■ continentale**

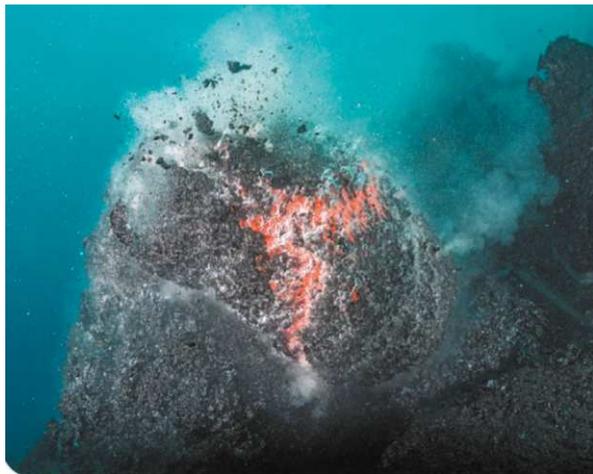
**● ● Gisements de charbon  
■ Terres émergées**

a. Les indices géologiques permettant la reconstitution de paléo-ceintures climatiques durant cette période montrent l'absence de dépôt **glaciaires** (donc pas de calottes polaires) et le développement de climats chauds à des latitudes **élevées** (Exemple : bauxite, témoin d'un climat **tropical** en Provence)

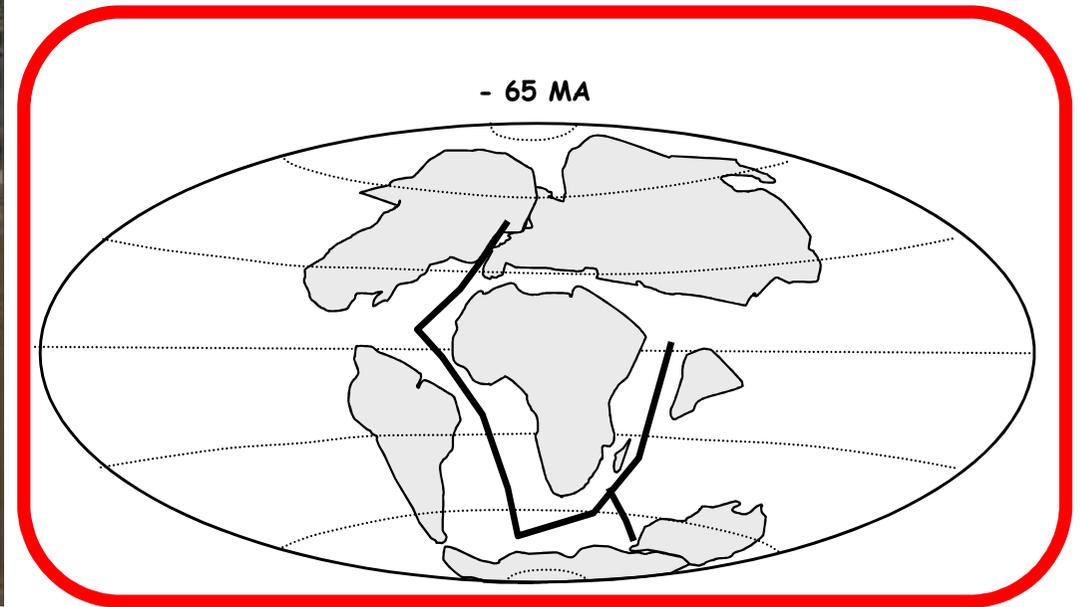
# Dispersion des masses continentales et activité des dorsales au Crétacé



Le volcanisme produit de grandes quantités de CO<sub>2</sub>

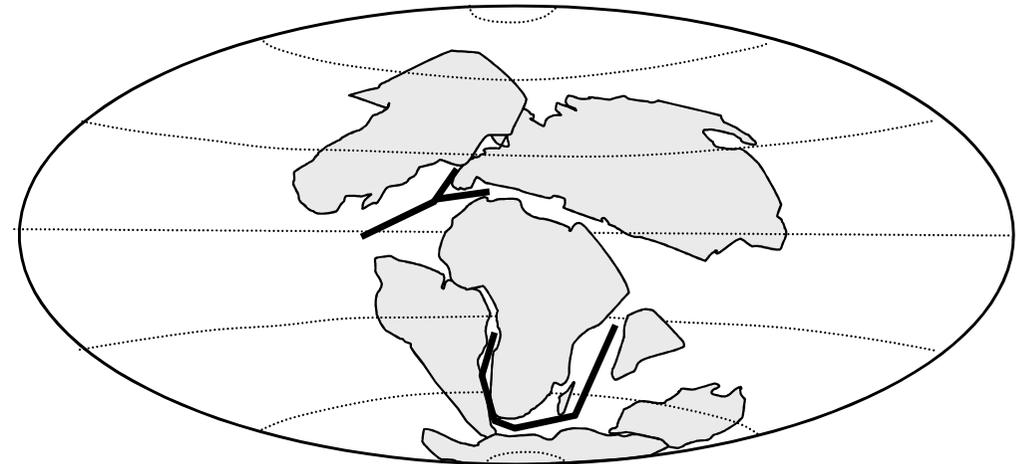


La formation de laves en coussin (*pillow lavas*) est typique du volcanisme de dorsale.



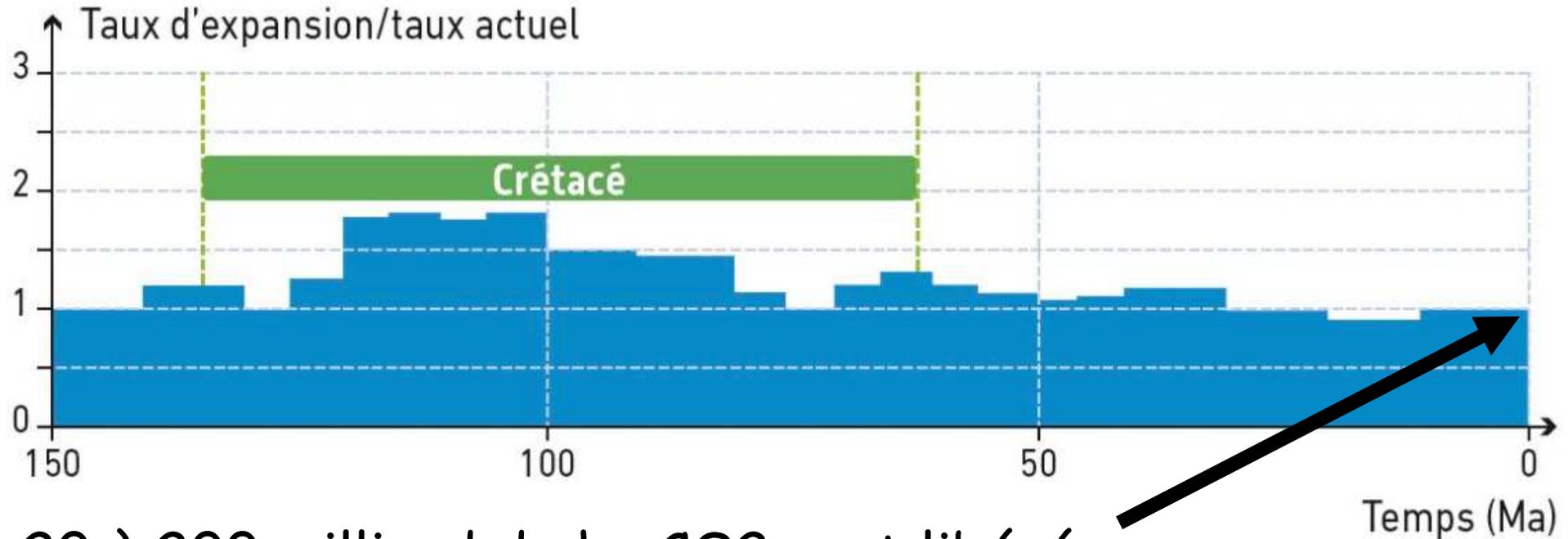
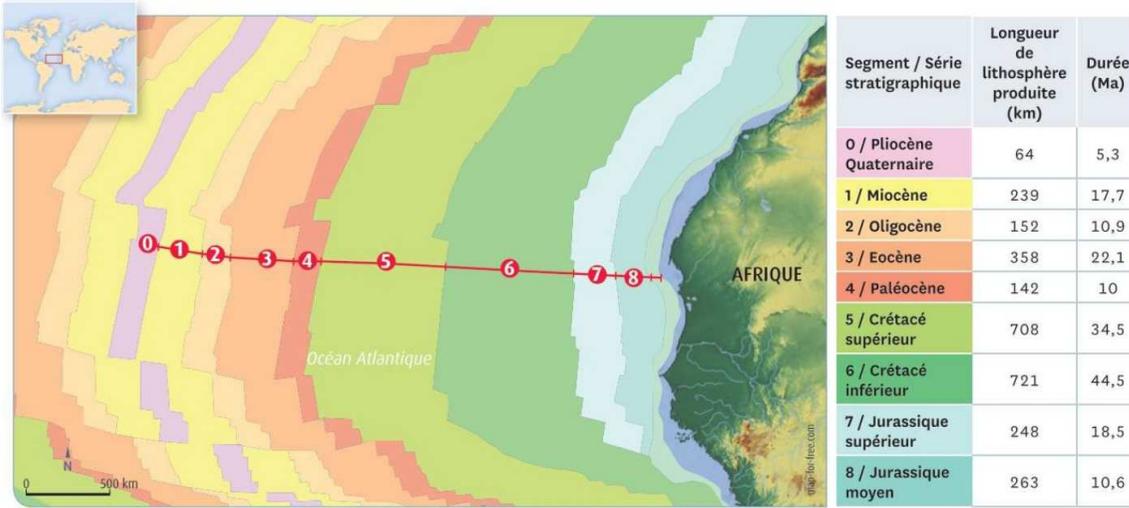
— dorsale

- 135 MA



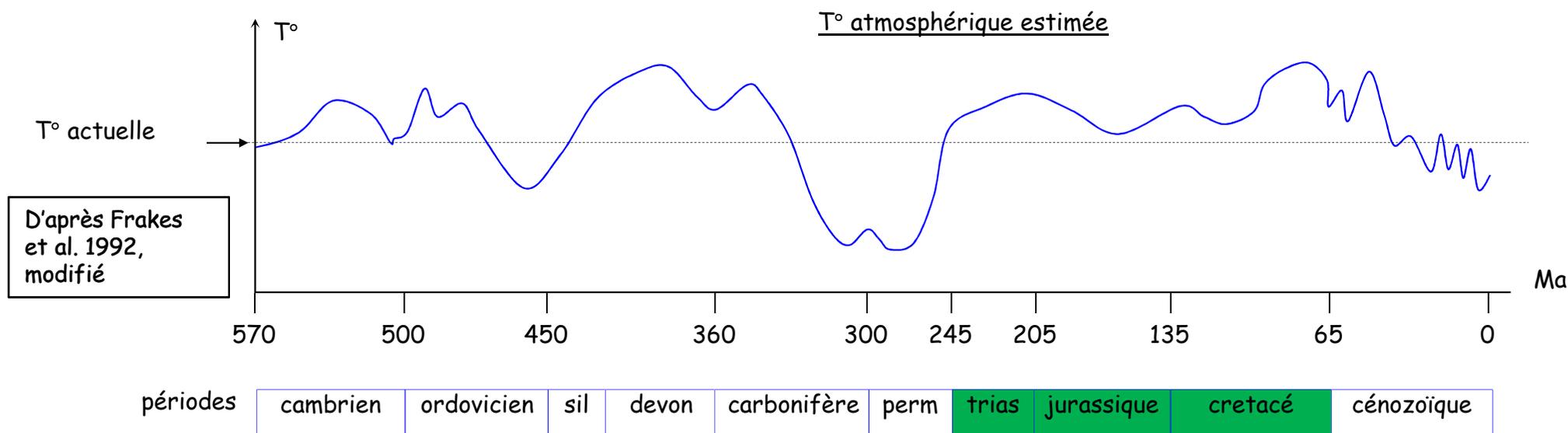
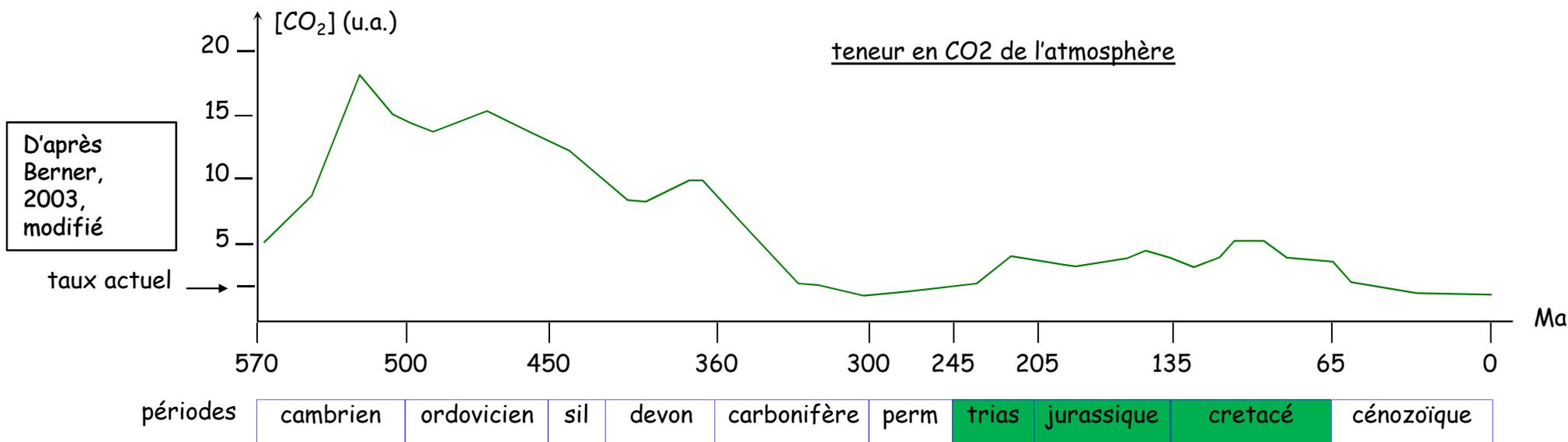
Déplacement des masses continentales et emplacement des dorsales entre début et fin Crétacé

# Taux d'expansion des dorsales au Crétacé



20 à 200 milliard de kg CO<sub>2</sub> sont libérés par an actuellement par les émissions volcaniques des dorsales océaniques

# Corrélation CO<sub>2</sub> / Température

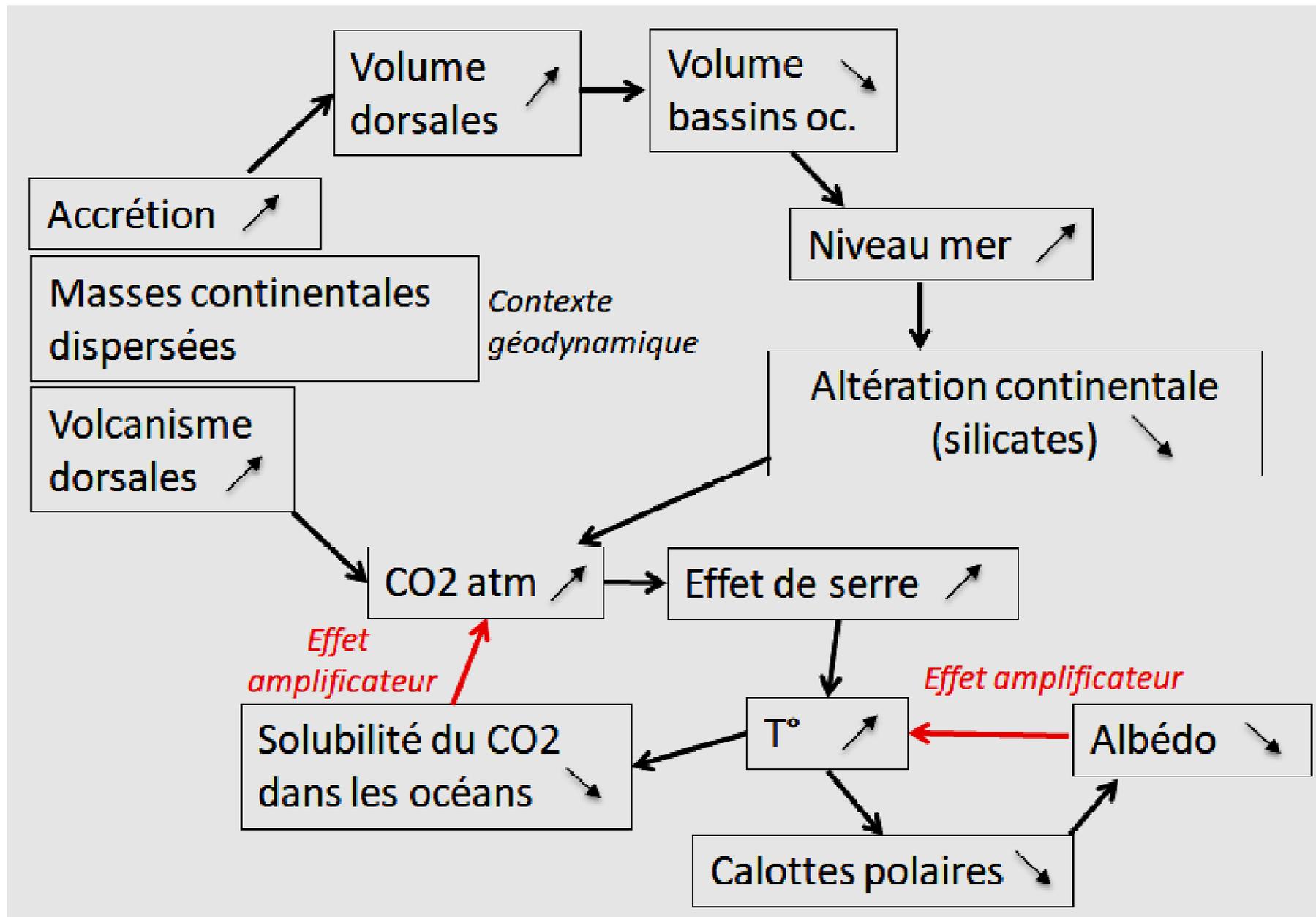


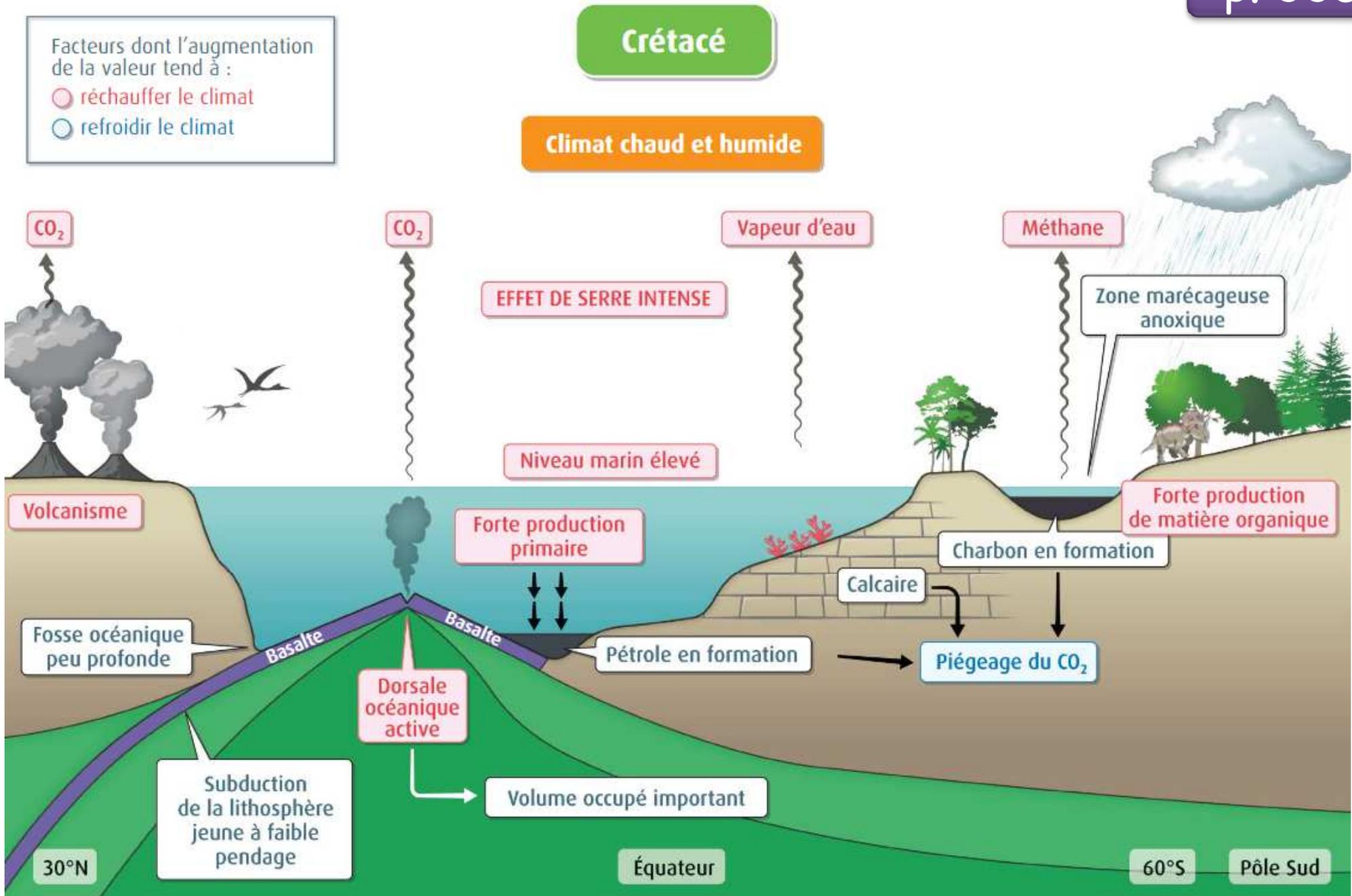
b. Les méthodes **indirectes** révèlent à cette période des taux élevés de CO<sub>2</sub> atmosphérique ayant entraîné un effet de serre important

- Cette **augmentation** de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> résulte d'une augmentation de l'activité des dorsales, dont le **volcanisme** libère du CO<sub>2</sub>

- En effet, cette période se caractérise par une **dispersion** des masses continentales avec un taux d'expansion océanique particulièrement **élevé**.

## Schéma 4 : Mécanismes susceptibles d'expliquer le climat chaud au Crétacé





4. Au Paléozoïque (-541 à 252 MA), de nombreux indices révèlent une glaciation de grande ampleur au Carbonifère-Permien.

Le pôle Sud au cours des temps géologiques

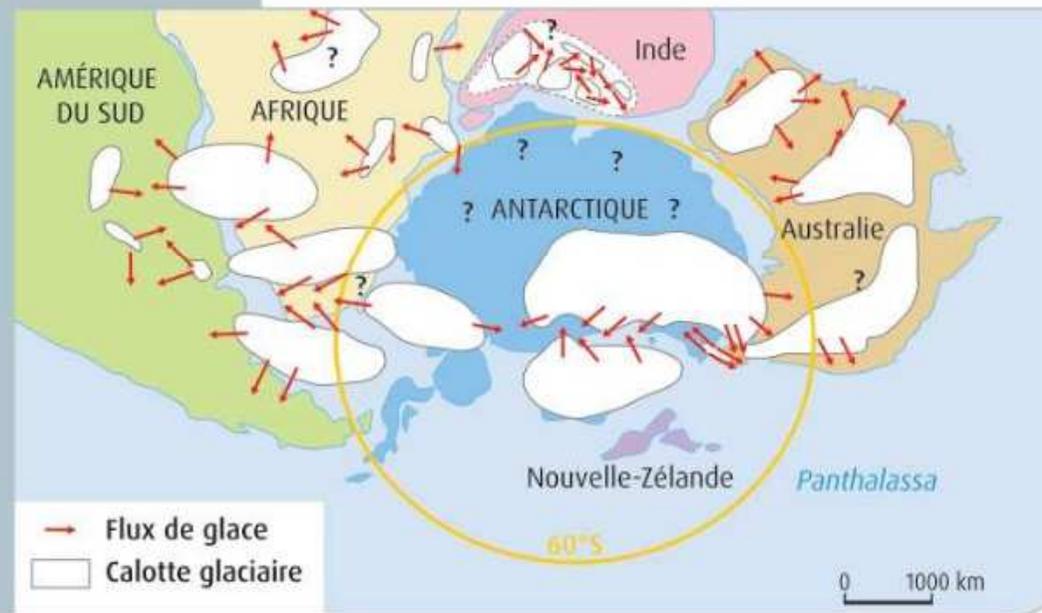
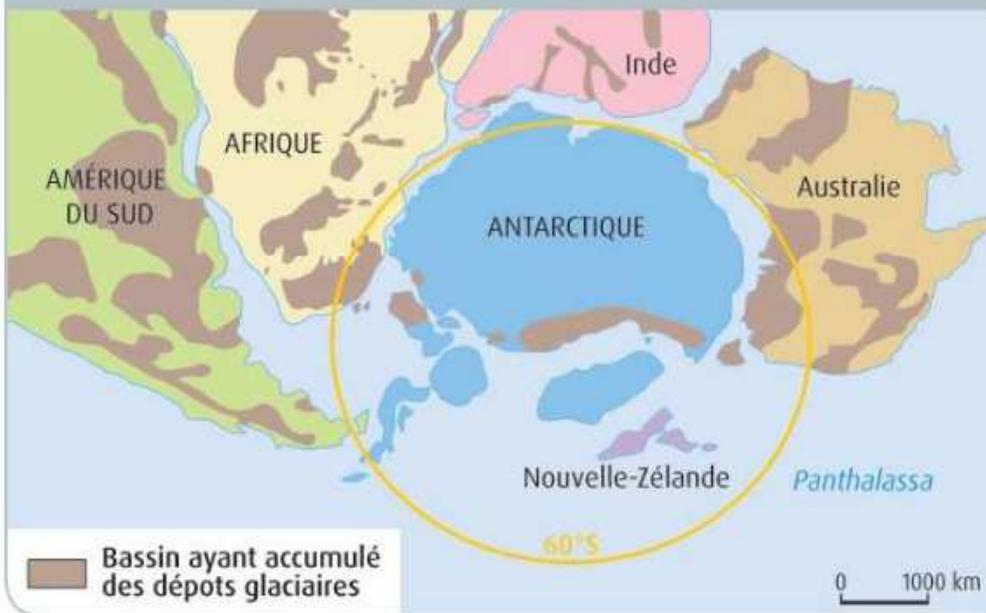
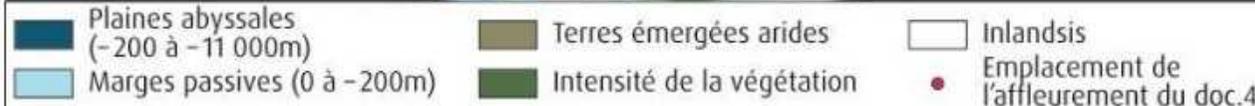


### 3 Reconstitution de l'agencement des continents au Permien et proposition de localisation des différents inlandsis.

Du milieu du Carbonifère à la fin du Permien inférieur se sont succédées plusieurs périodes glaciaires, plus ou moins intenses, entrecoupées de périodes interglaciaires. Sur certains continents, les stries permettent de reconstituer le déplacement de la glace et les tillites, les dépôts d'éléments transportés par les glaciers.

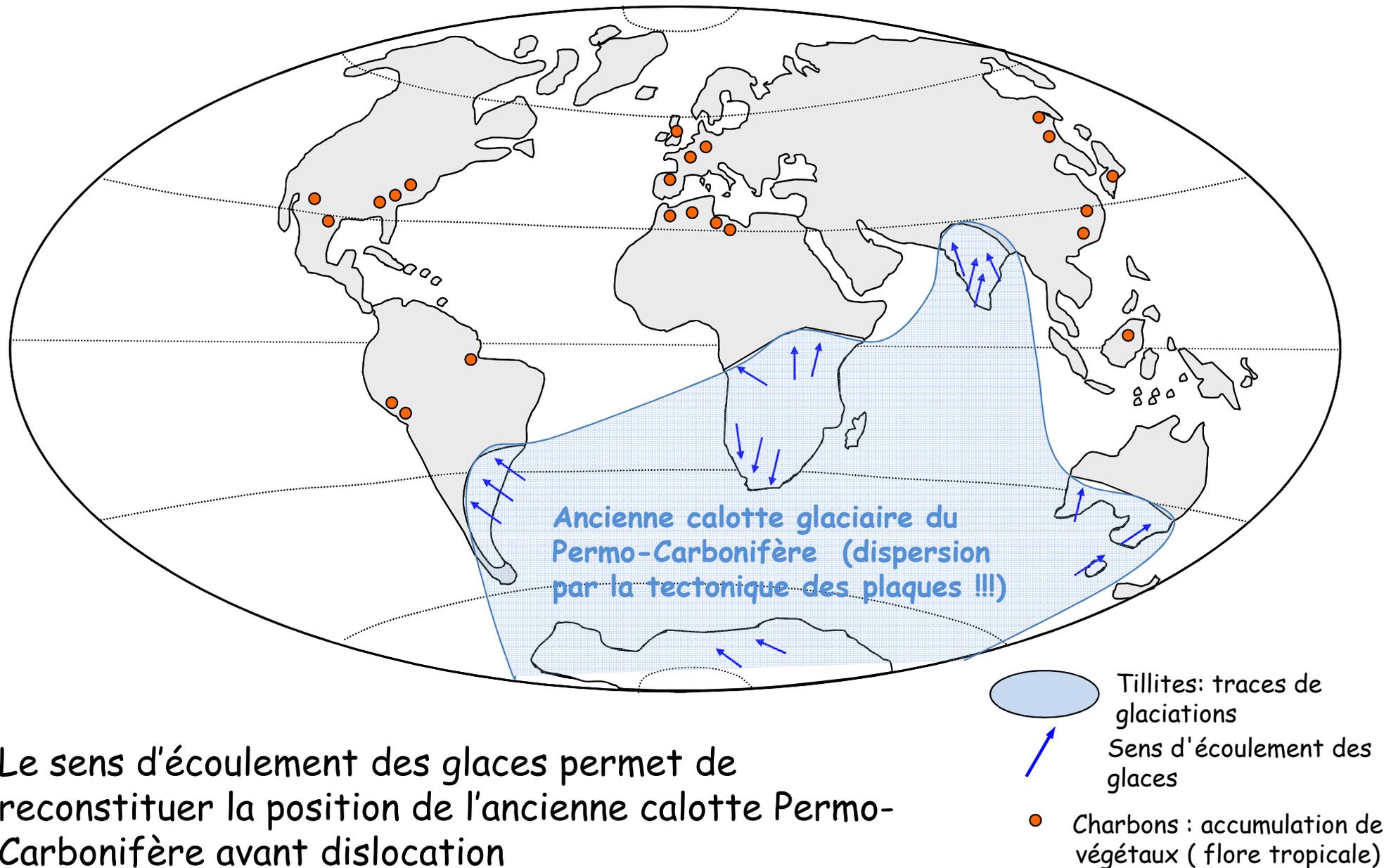


©2016 Colorado Plateau Geosystems, Inc.



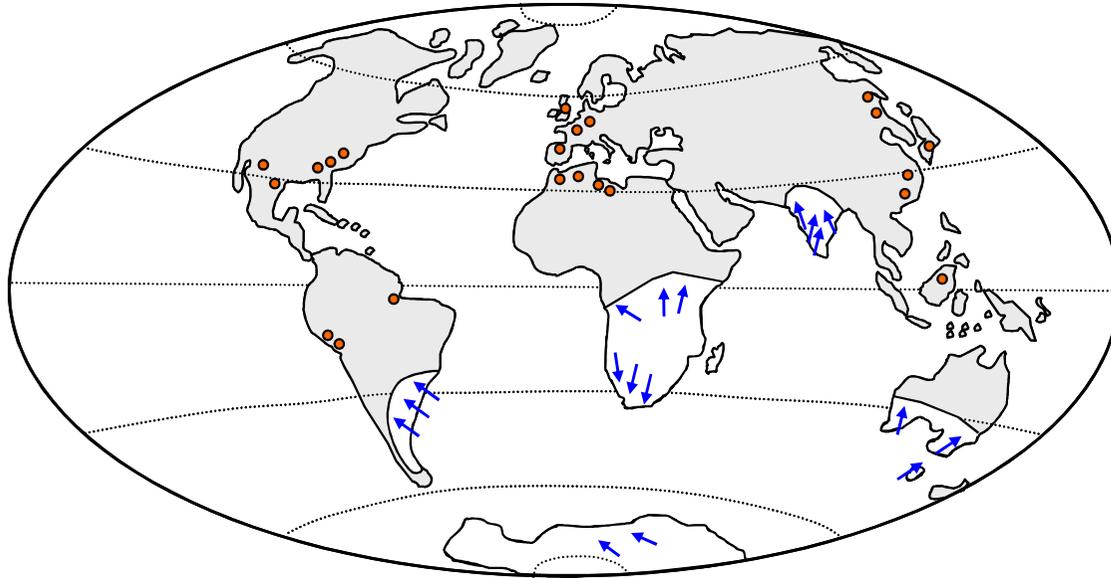
# Localisation et nature des roches datées du carbonifère

## Répartition actuelle



Le sens d'écoulement des glaces permet de reconstituer la position de l'ancienne calotte Permo-Carbonifère avant dislocation

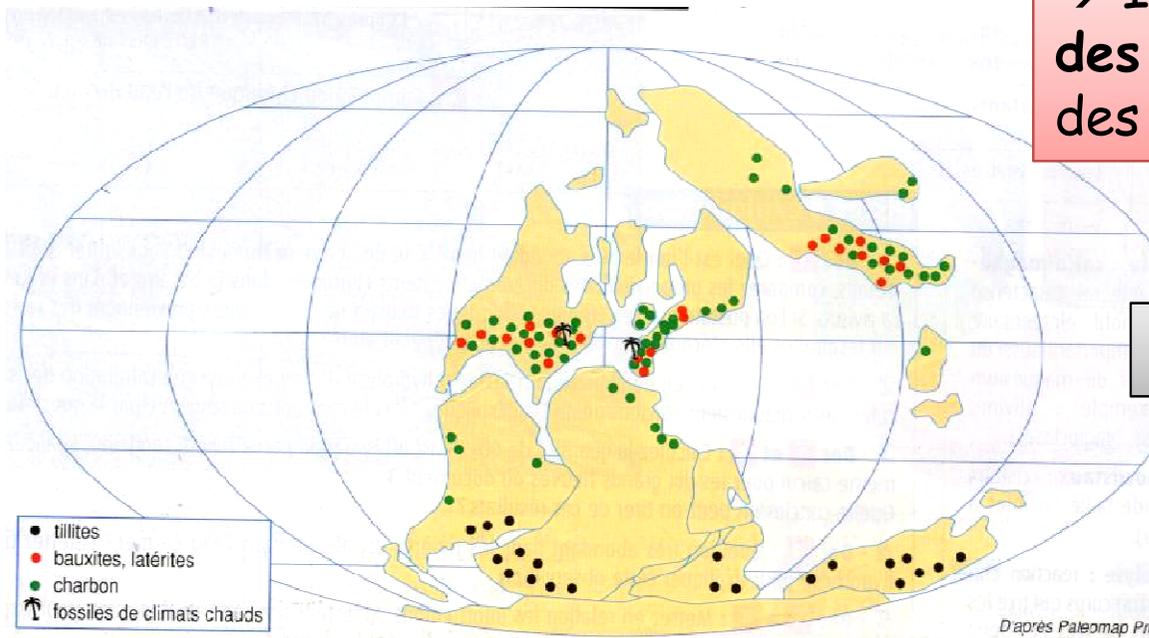
# Localisation et nature des roches datées du carbonifère



Actuel

La répartition actuelle géographique des archives géologiques ne traduit pas qu'une modification climatique

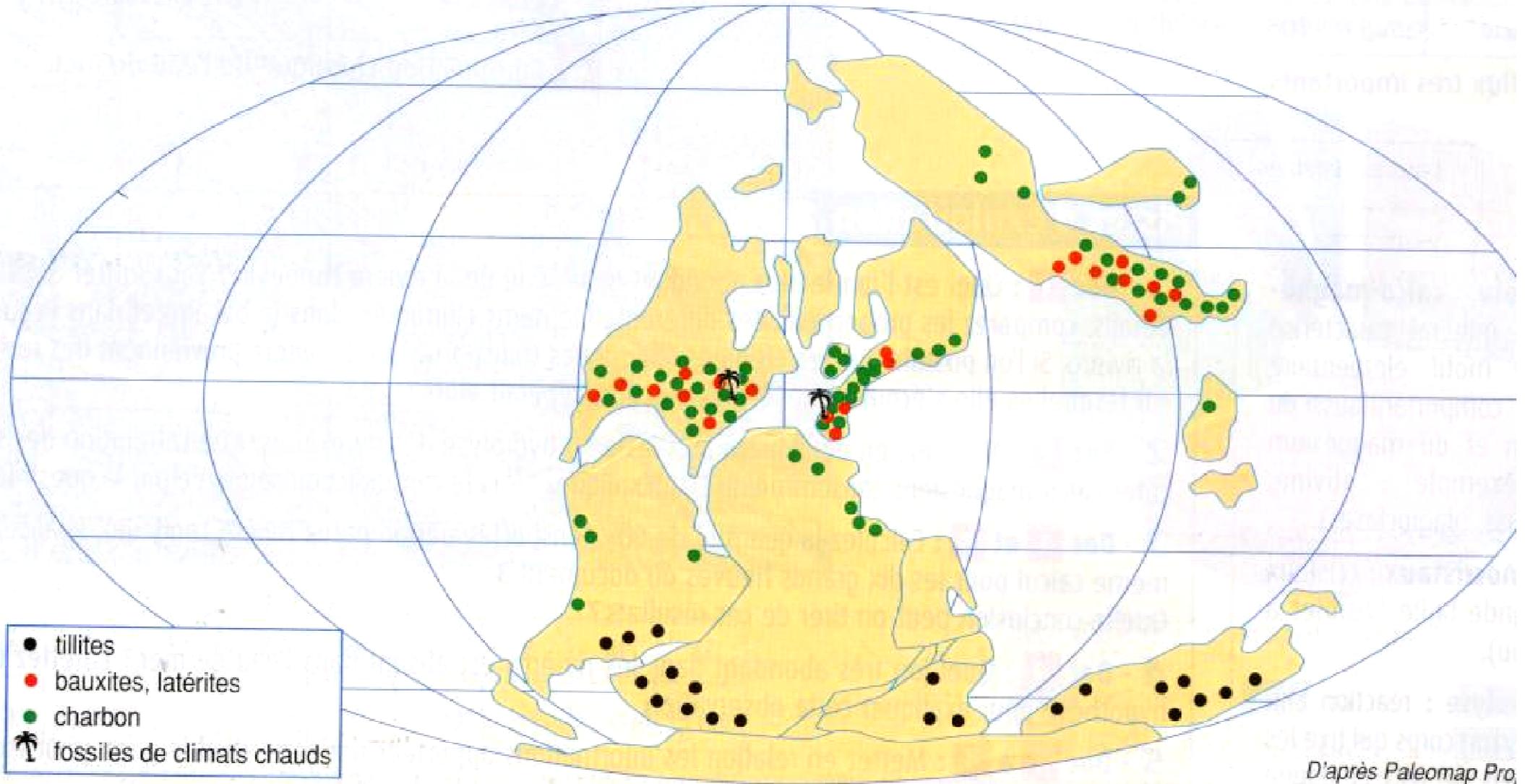
→ Il faut tenir compte de la **mobilité des continents** dans la reconstitution des climats à l'échelle géologique



Carbonifère

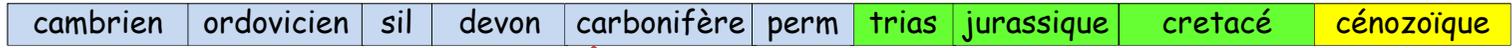
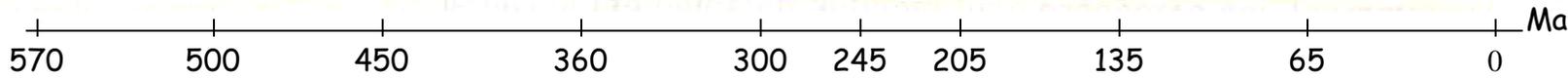
# Localisation et nature des roches datées du carbonifère

Paléogéographie du Carbonifère

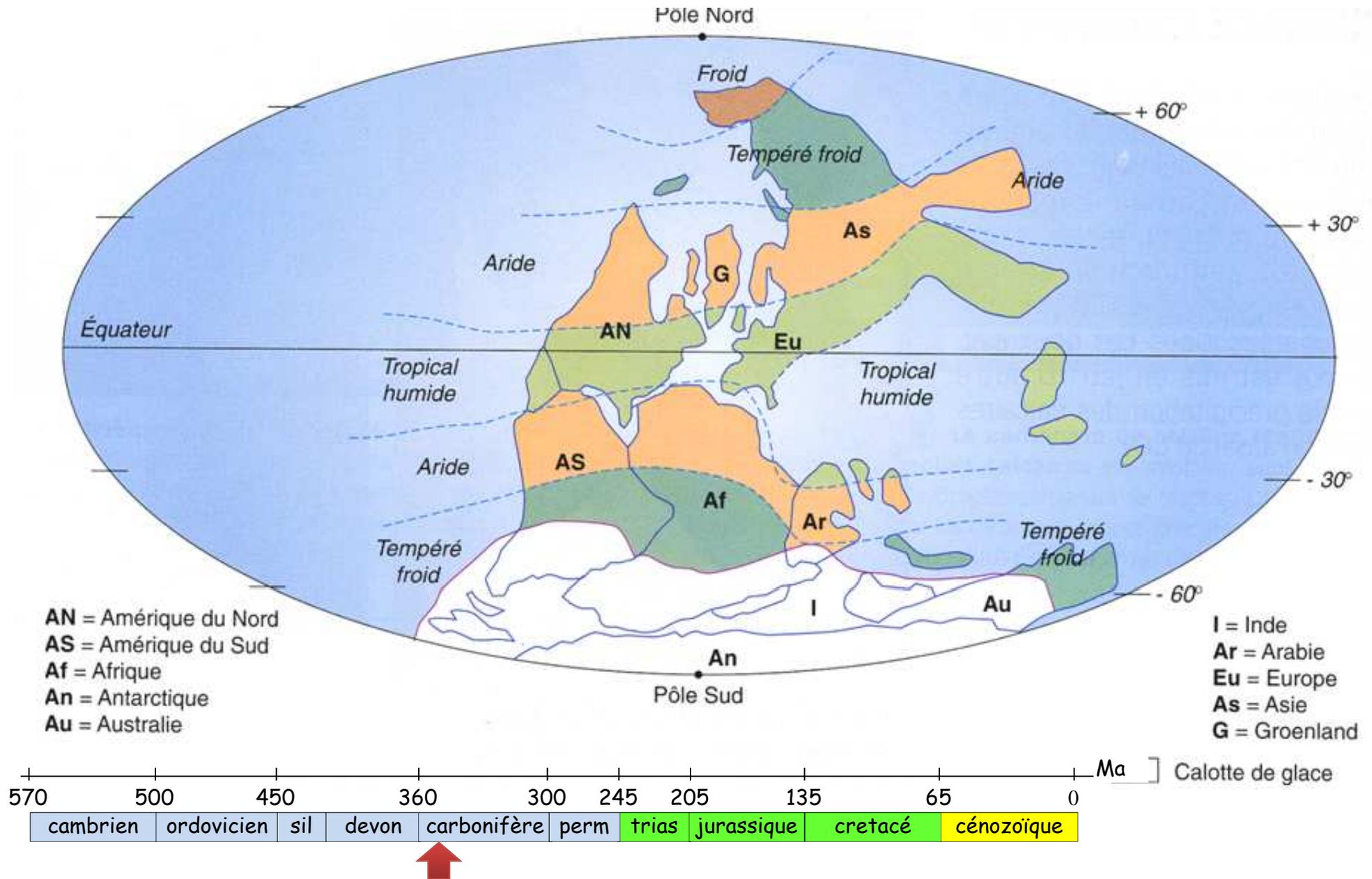


- tillites
- bauxites, latérites
- charbon
- 🌴 fossiles de climats chauds

D'après Paleomap Pro



# Répartition des continents et zones climatiques au carbonifère supérieur -300 Ma



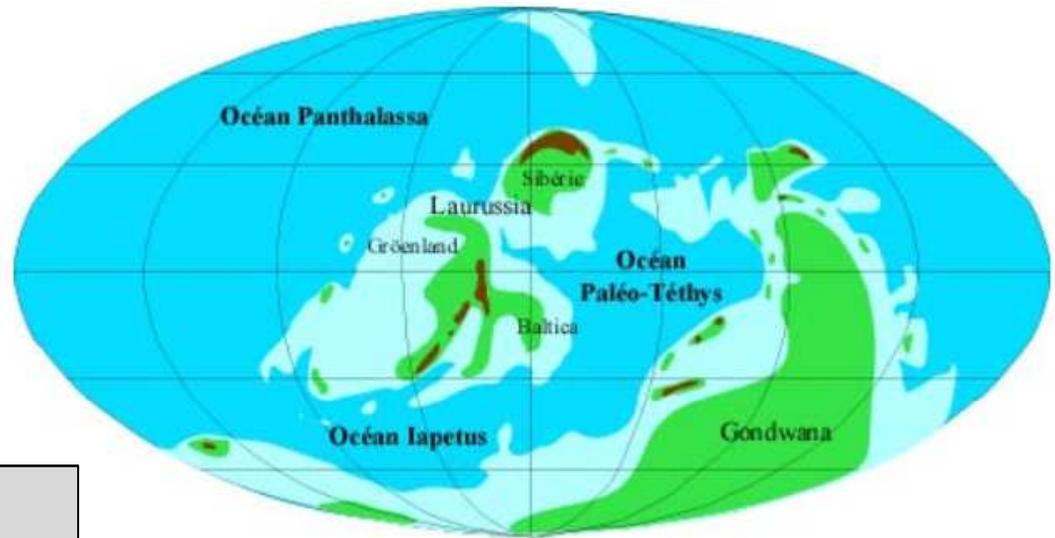
a. Au Carbonifère, la répartition des dépôts **glaciaires** aux basses latitudes révèle une extension particulièrement **grande** de la calotte polaire (jusqu'à 30° de latitude c'est-à-dire les tropiques)

# Altération de la chaîne Hercynienne et CO2

## SILURIEN INF

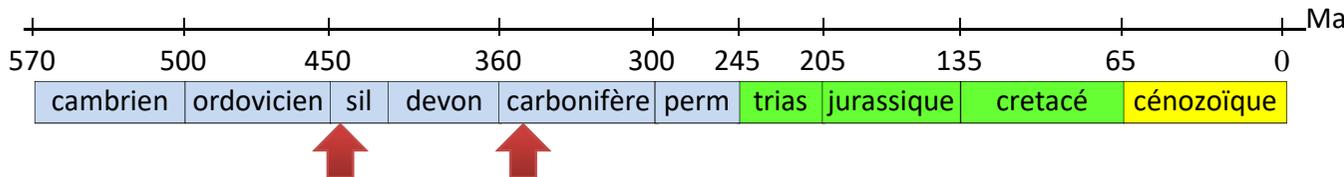
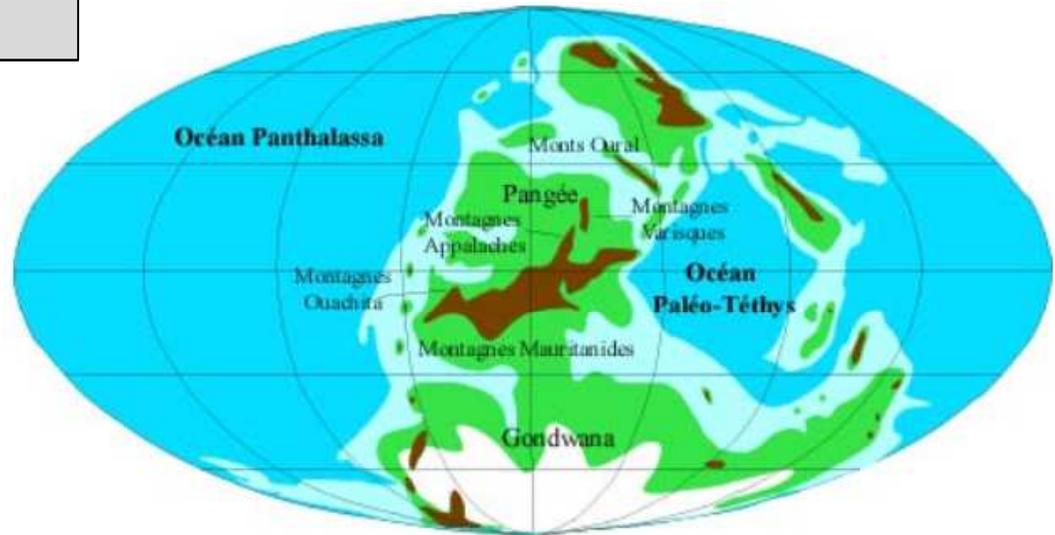
*Reliefs en marron*

Le développement des reliefs est favorable à une augmentation des processus d'érosion

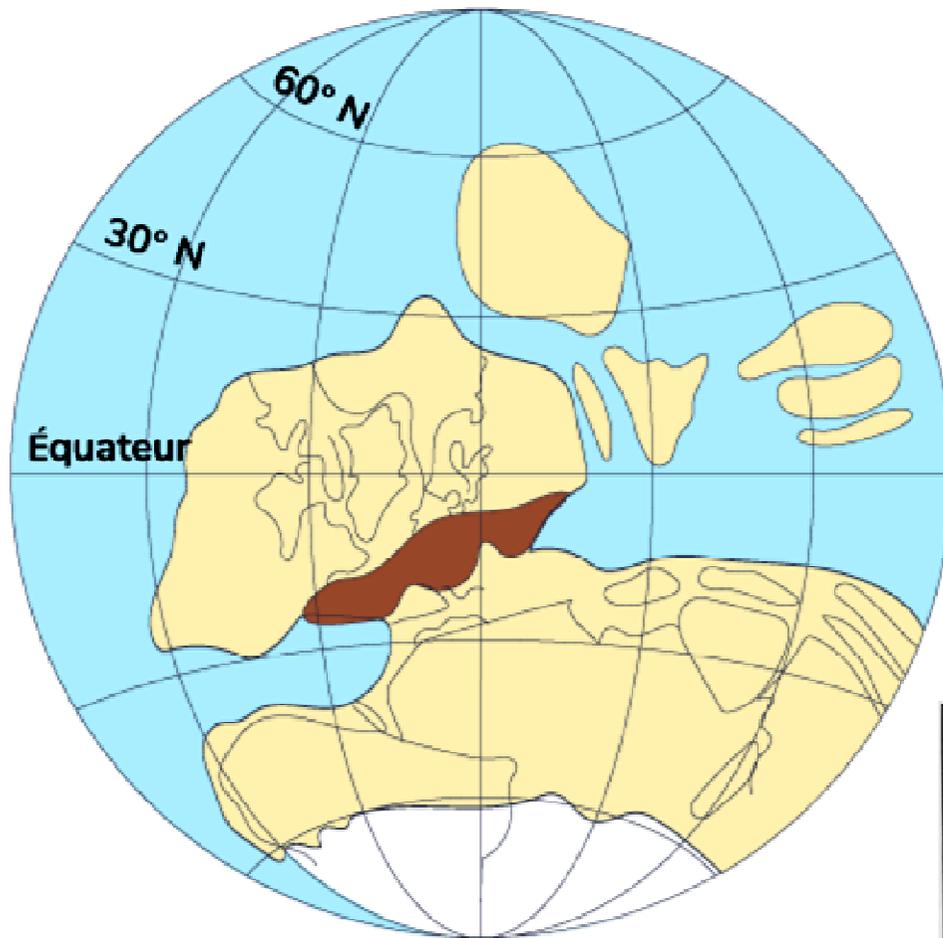


## CARBONIFERE INF

*La collision entre la Laurasia et le Gondwana engendre la chaîne Hercynienne.*

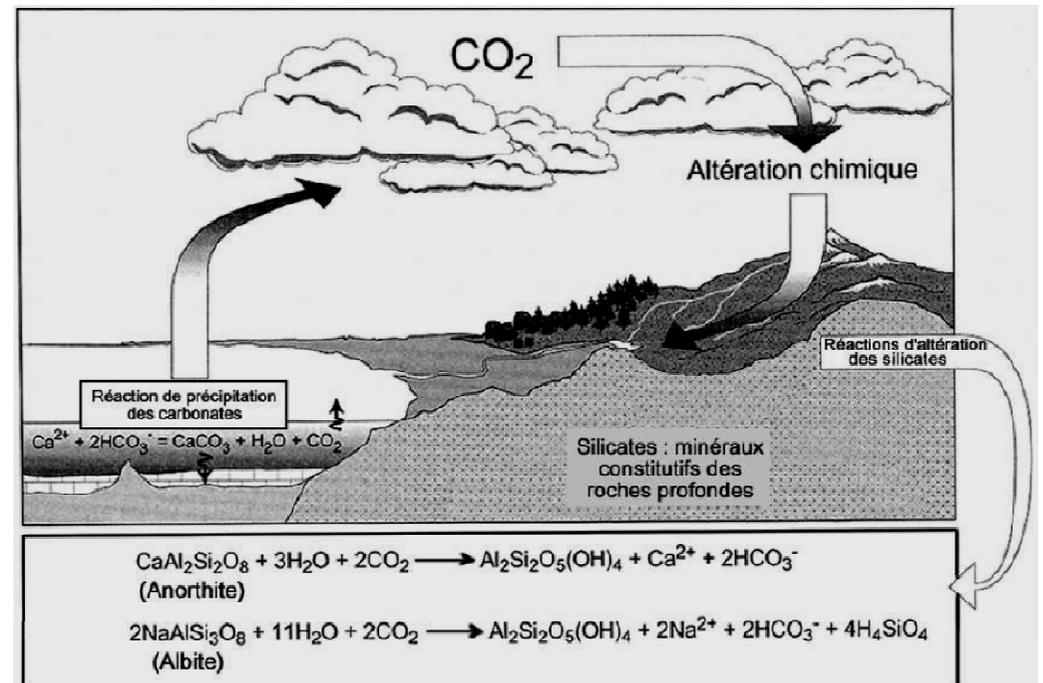
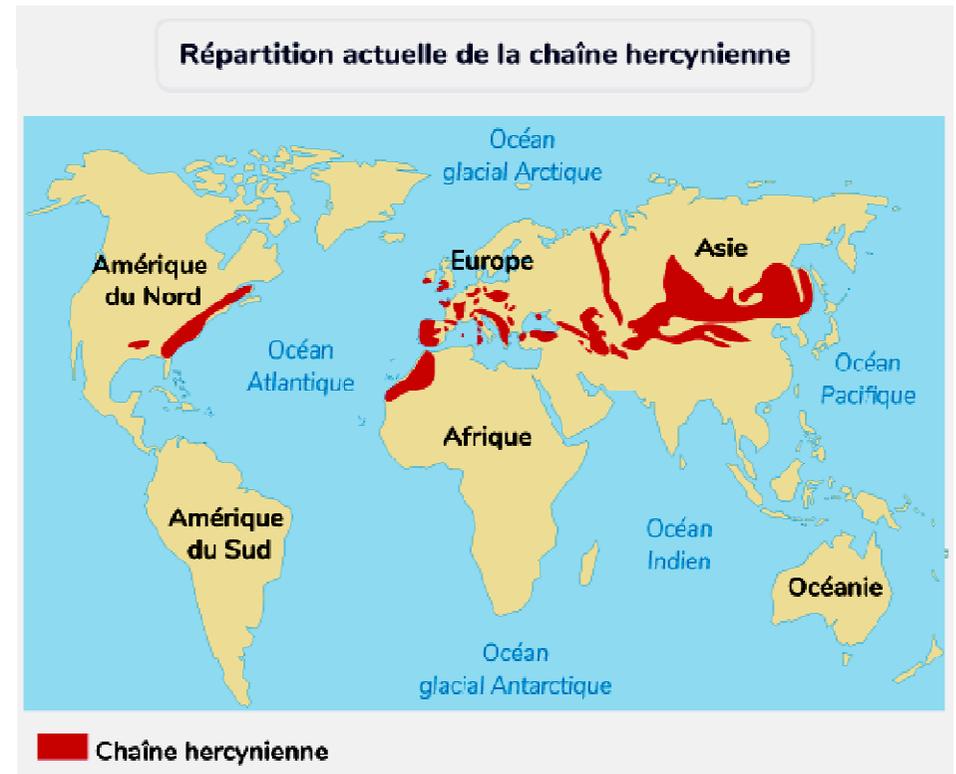


# Altération de la chaîne Hercynienne et CO<sub>2</sub>



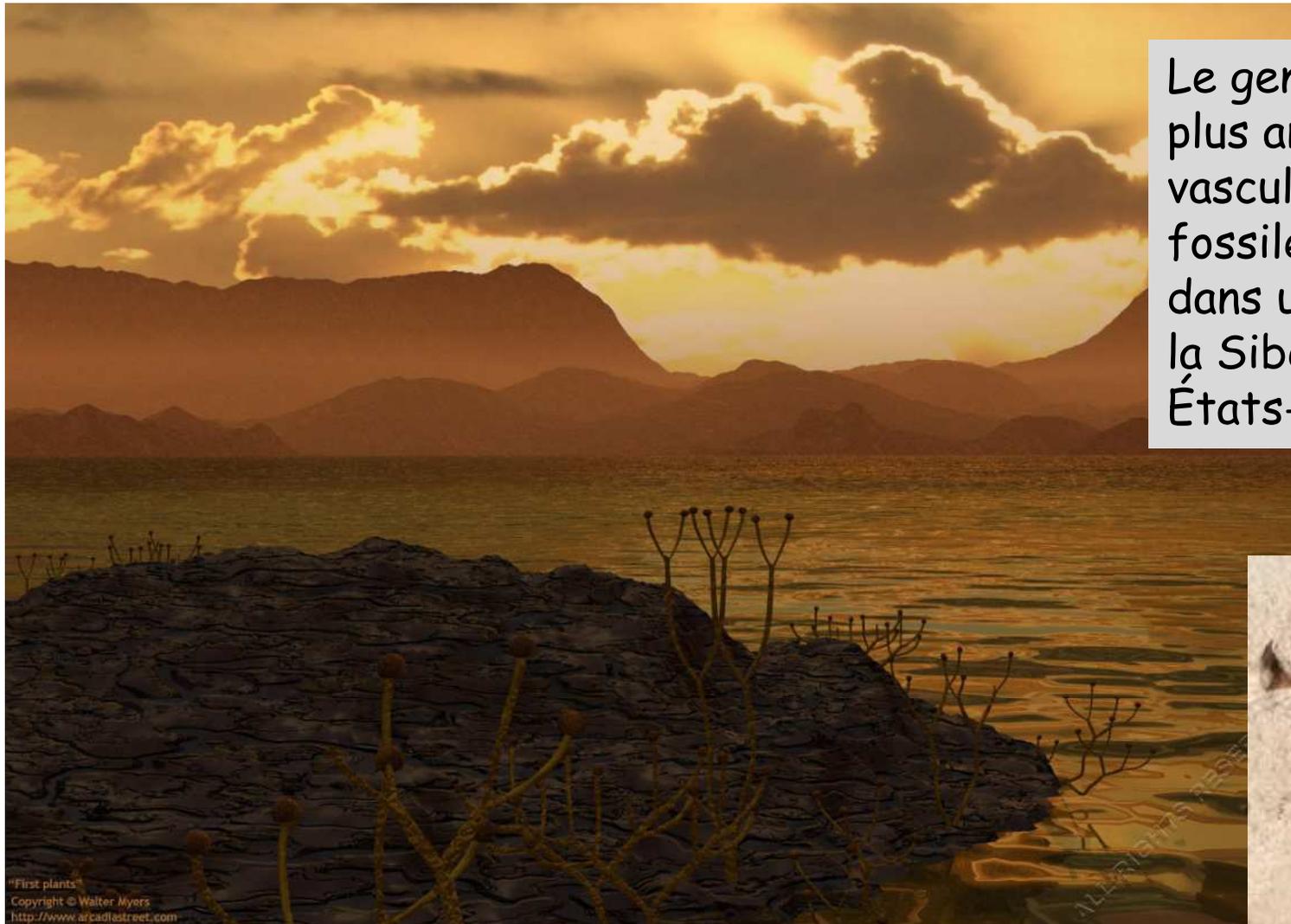
Carbonifère inférieur (340 Ma)

- Masses continentales
- Chaîne hercynienne
- Domaines océaniques
- Calotte glaciaire

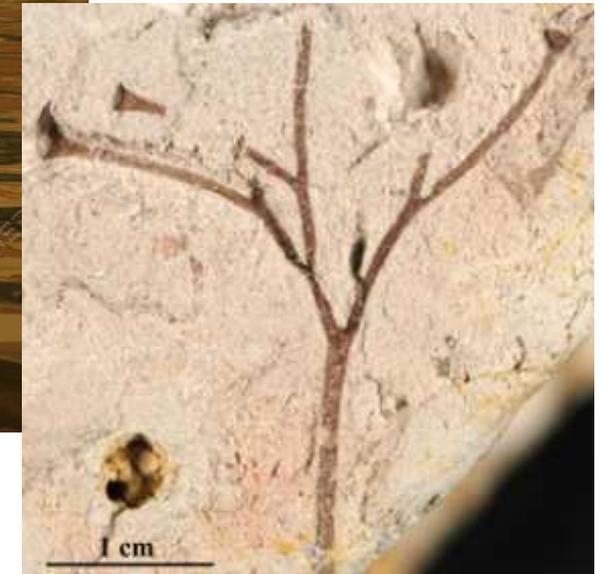


# L'altération favorisée par l'évolution des végétaux

## Paysage du Silurien avec *Cooksonia*



Le genre *Cooksonia* est la plus ancienne plante vasculaire connue. Des fossiles ont été trouvés dans une région allant de la Sibérie à l'est des États-Unis et au Brésil.



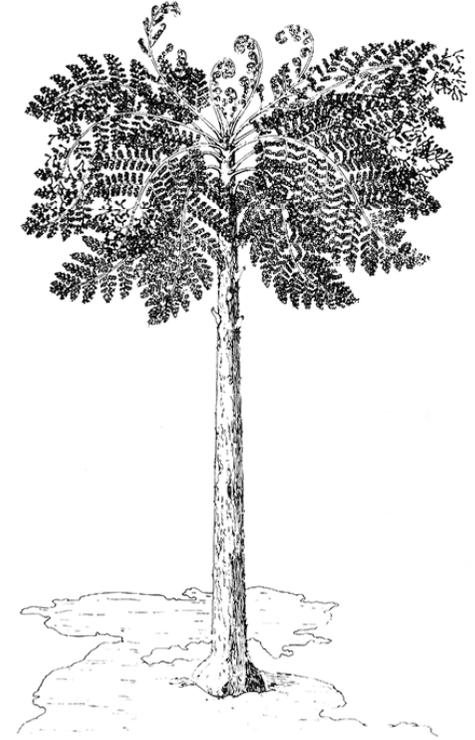
"First plants"  
Copyright © Walter Myers  
<http://www.arcadiastreet.com>

# L'altération favorisée par l'évolution des végétaux

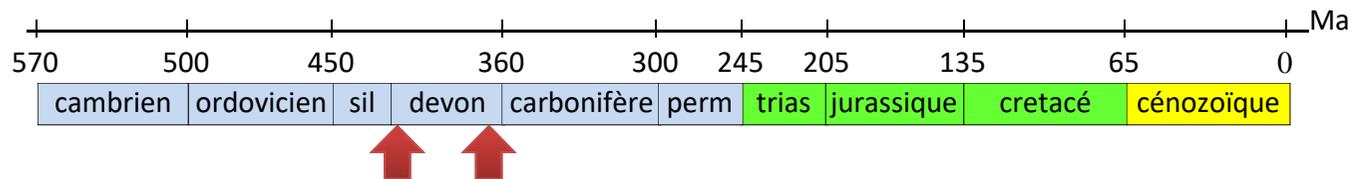
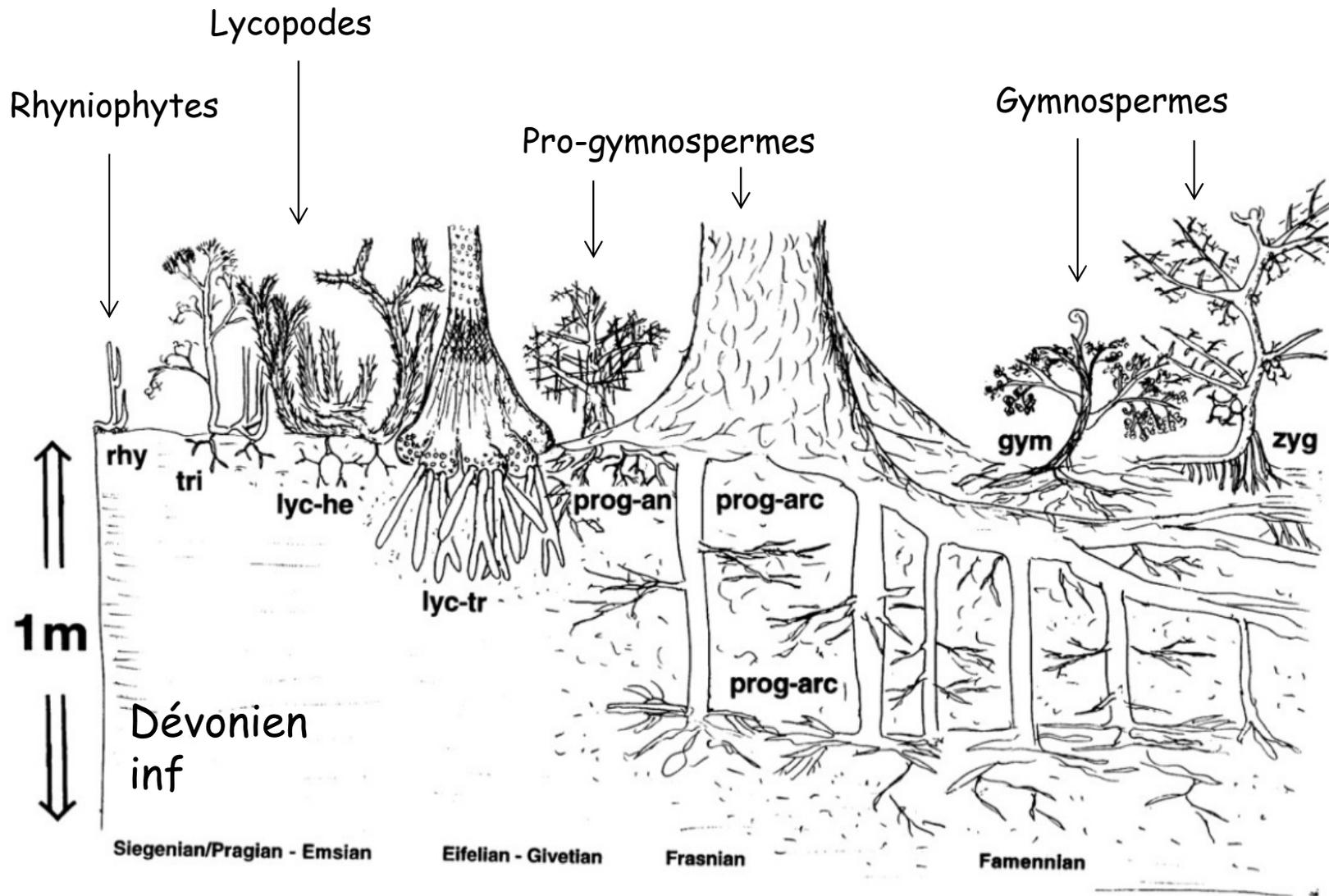
Paysage fin Dévonien



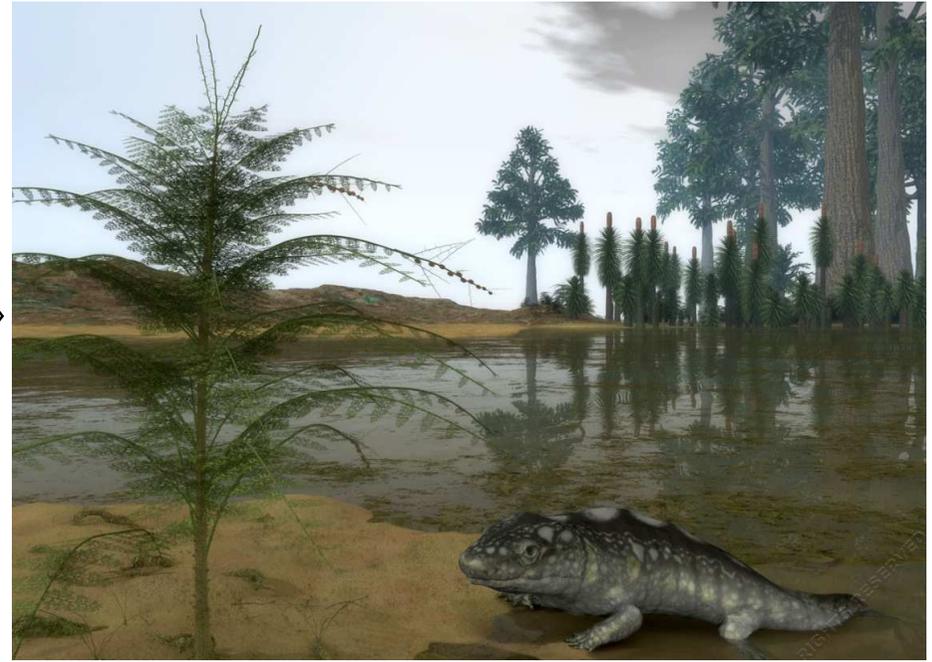
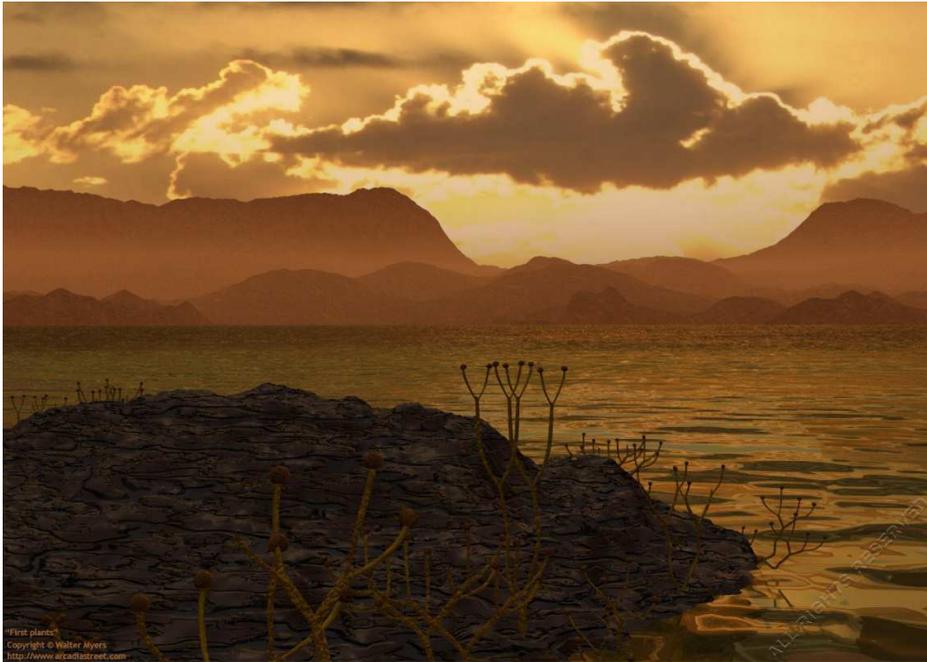
Tronc fossile et reconstitution d'Eospermatopteris



# L'altération favorisée par l'évolution des végétaux

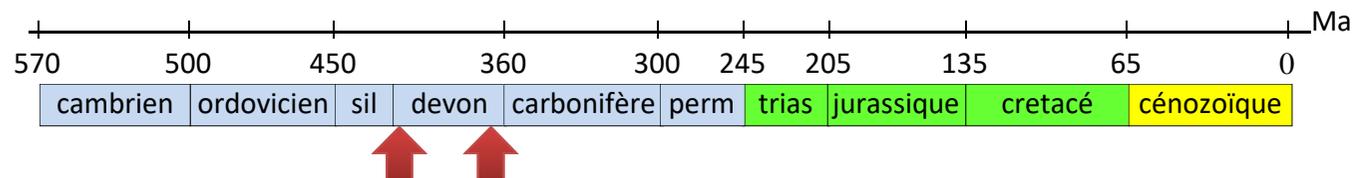


# L'altération favorisée par l'évolution des végétaux



Les végétaux vasculaires (avec qui apparaissent les premières "racines") colonisent le milieu continental jusqu'alors occupé par des tapis d'algues et de lichens primitifs. On constate grâce aux archives paléontologiques que la taille et la profondeur des racines augmentent jusqu'au Dévonien terminal avec un enracinement déjà profond dès le Dévonien inférieur (-390 Ma)

Cet enracinement profond aura eu pour effet le plus évident, une apparition de fractures dans les roches du sous-sol qui augmente la "surface d'attaque" et accélère ainsi l'altération par l'eau.



b. Les méthodes indirectes révèlent à cette période des taux **faibles** de CO<sub>2</sub> atmosphérique ayant entraîné un effet de serre peu **intense** donc un climat froid. Plusieurs phénomènes sont susceptibles d'expliquer la diminution du taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique :

- *Altération d'une de la **chaîne** Hercynienne (vaste chaîne de montagne située à proximité de l'équateur) favorisant le **piégeage** du CO<sub>2</sub>*

# Rappel sur le cycle du C



Que devient la biomasse végétale ?

OU



CO<sub>2</sub>

O<sub>2</sub>



Dans ce cas, moins d'O<sub>2</sub> consommé  
et moins de CO<sub>2</sub> rejeté

# Troc fossile de Sigillaire (Site de Champclauson, Gard)



# Fossile de Neuropteris et reconstitution



Ptéridophyte actuelle



# Empreinte de tronc de Lepidodendron (fossile) et reconstitution

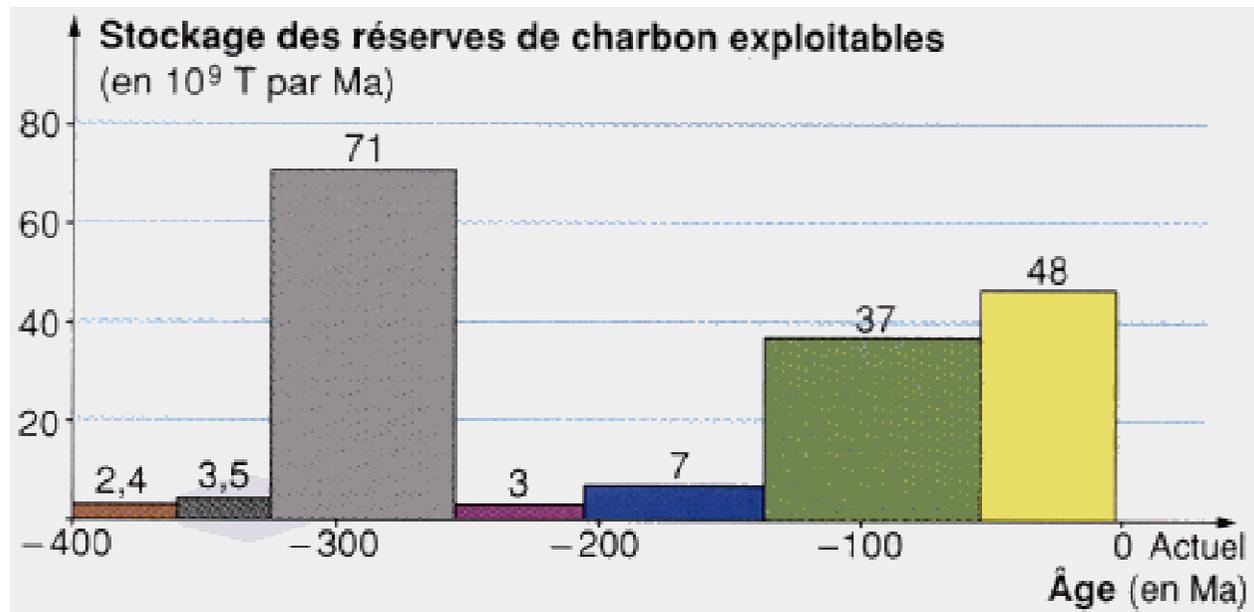


# Fossilisation de la matière organique au Paléozoïque

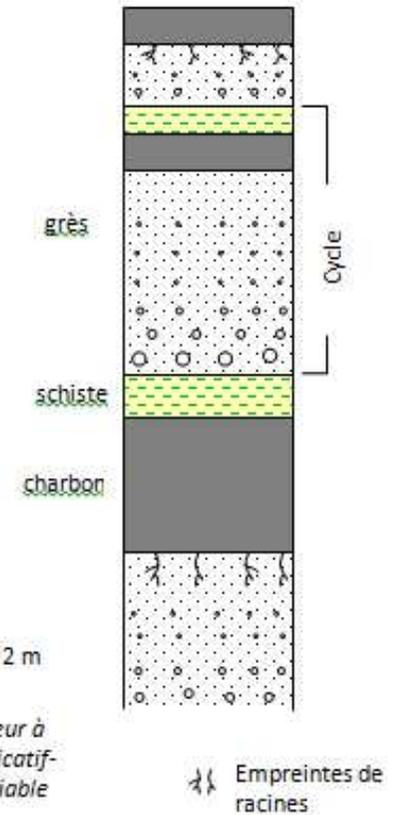


Photographie : Pierre Thomas

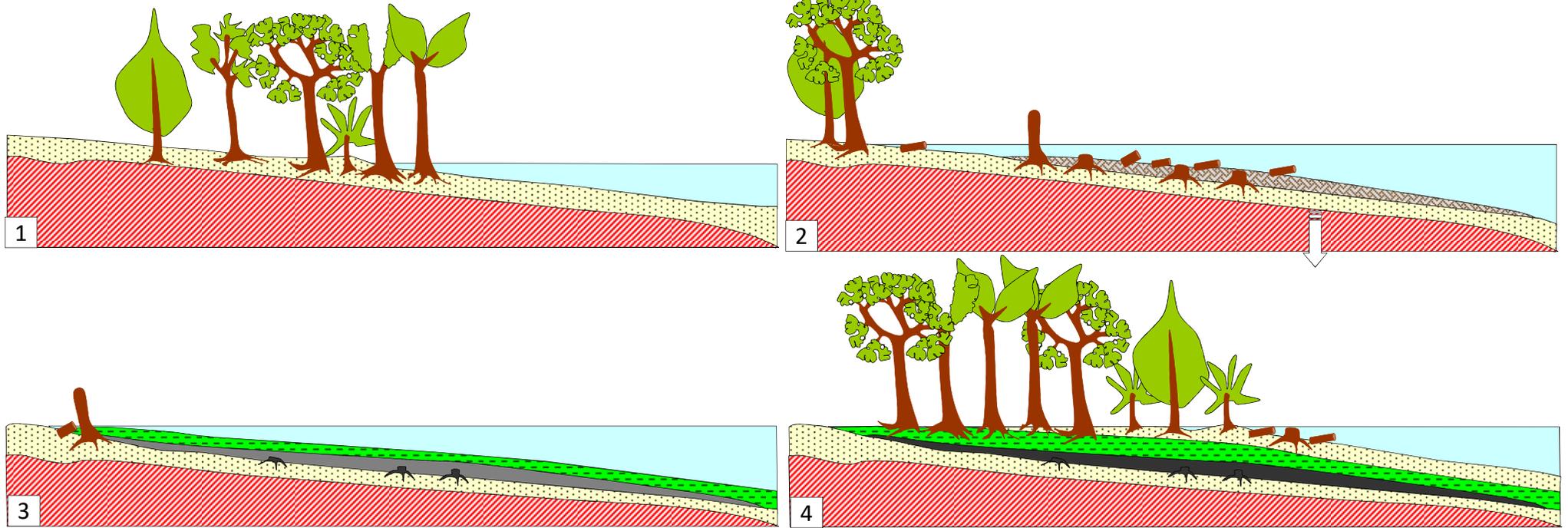
# Fossilisation de la matière organique au Paléozoïque



## Gisement de charbon à Graissessac (Hérault)



# Etapes de formation du charbon (simplifié)



 argiles

 charbon

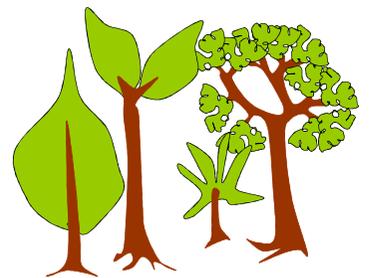
 débris végétaux en cours de carbonification

 sables, graviers,...

 substratum

 subsidence

 eau de la lagune

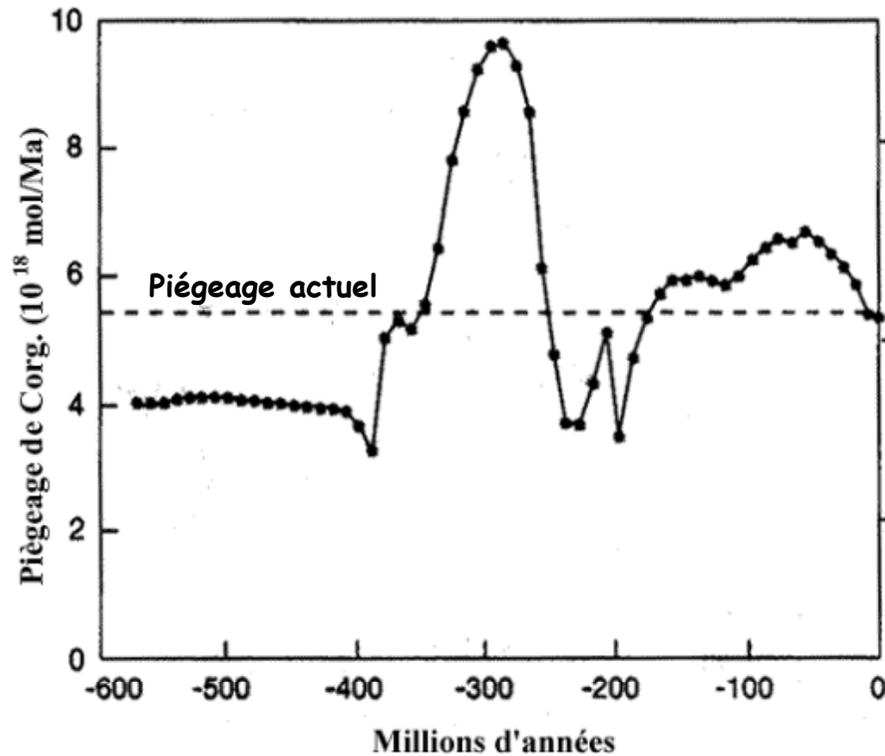


forêt marécageuse :  
coniférales, cordaitales,  
....

  
troncs, branches dans le  
sédiment et en cours de  
carbonification

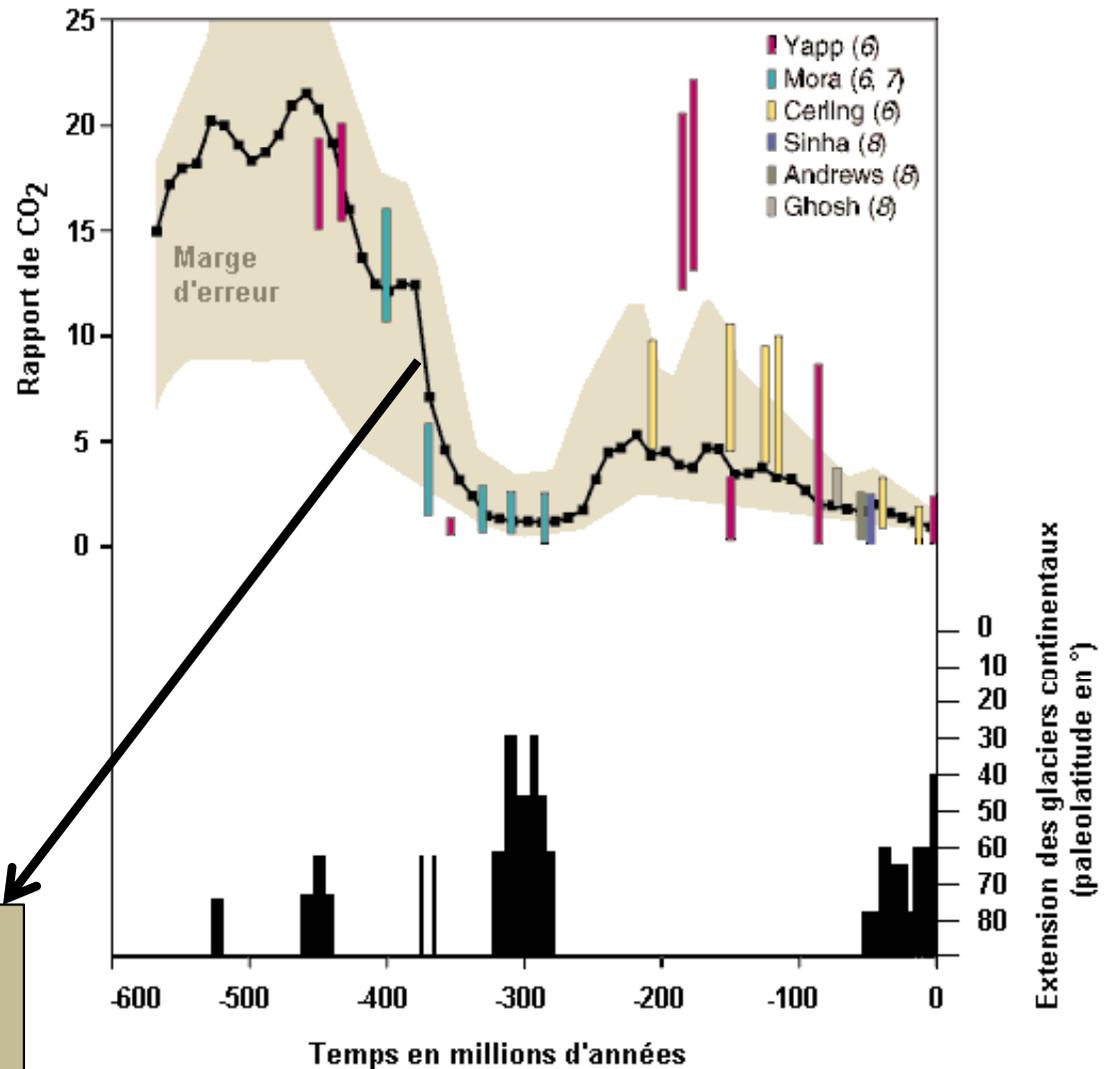
# Paléozoïque: Température, CO<sub>2</sub> et piégeage de carbone organique

Estimation de la quantité de carbone organique piégé basée sur la mesure du rapport <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C



D'après Sciences de la Terre et de l'Univers Collectif, Vuibert, août 1999

Rapport de CO<sub>2</sub> = rapport entre le taux de CO<sub>2</sub> au temps t / Taux de CO<sub>2</sub> actuel

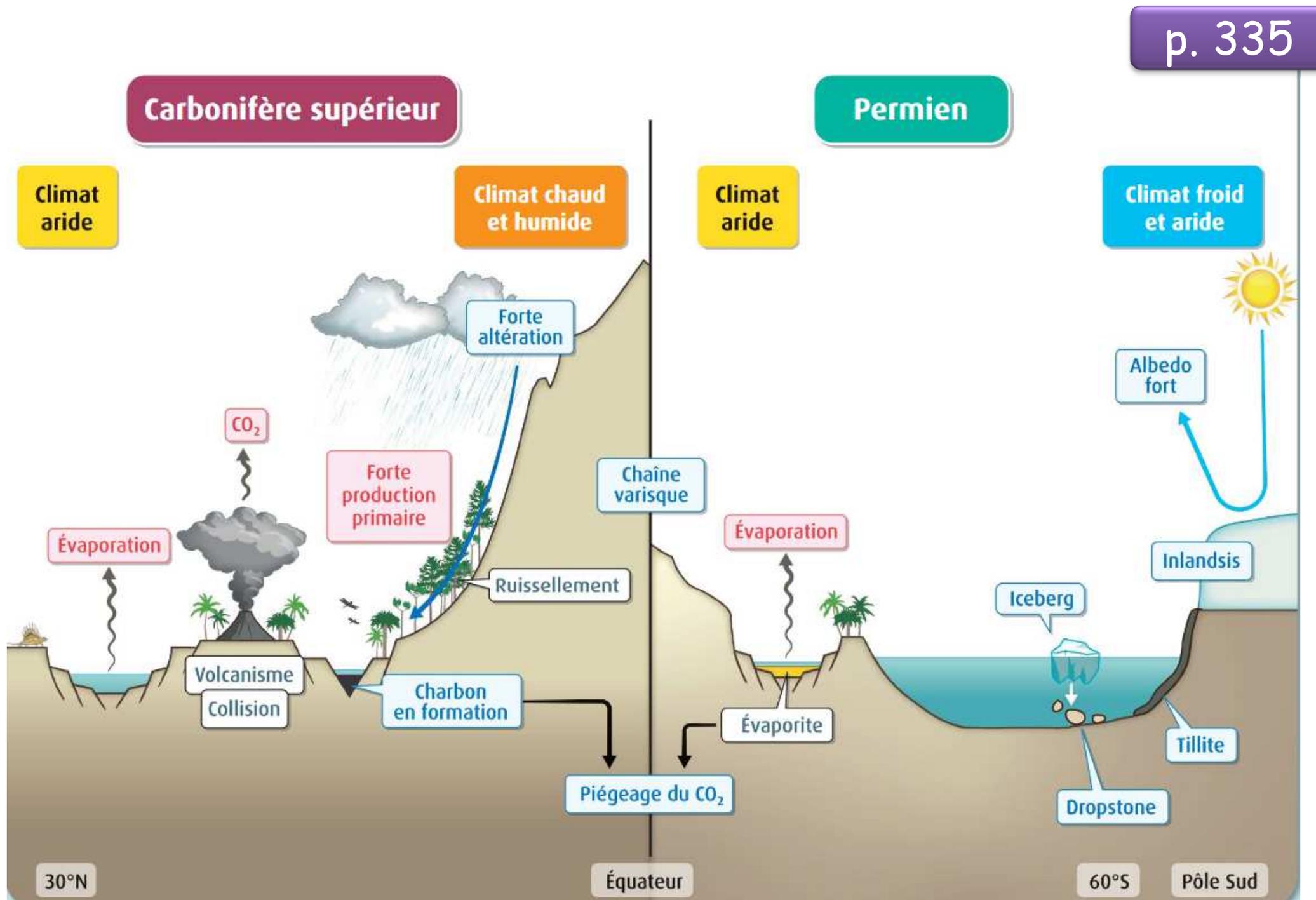


Données déduites de plusieurs indices (stomatiques, sédimentaires, paléontologiques...)

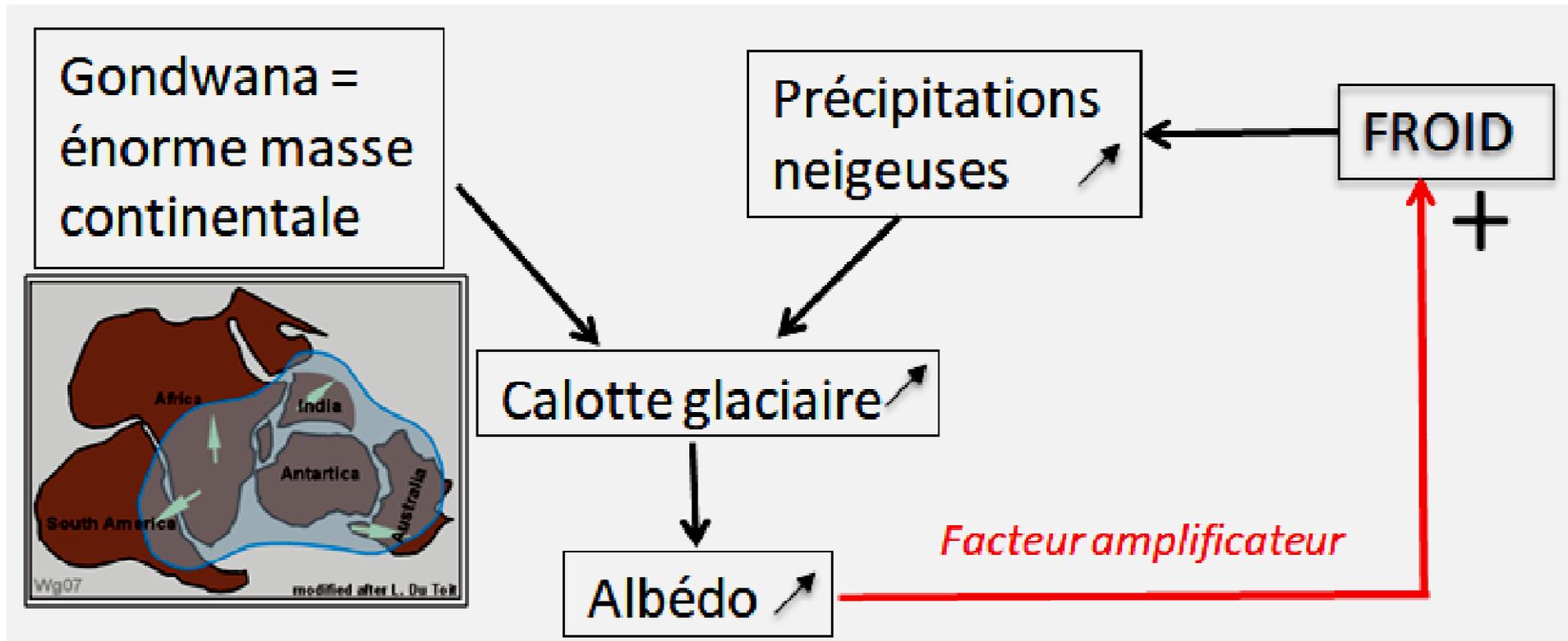
- Fossilisation de grandes quantités de matière **organique** par enfouissement de matière végétale (formation de charbon), évitant ainsi le retour à l'atmosphère du  $CO_2$  causé par la **décomposition** de la matière organique.

# Paléozoïque: Bilan des paramètres influençant le climat

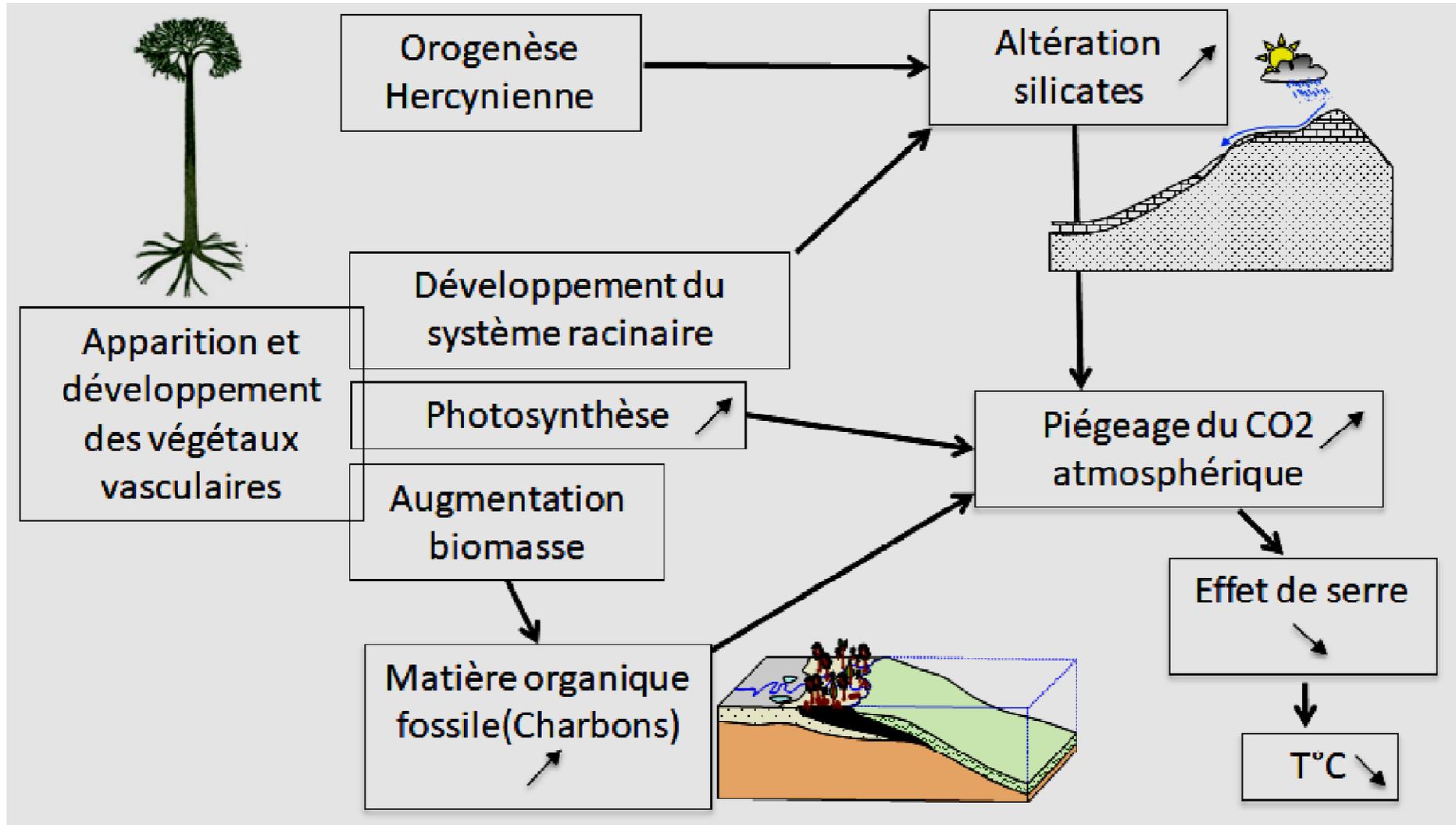
p. 335



# Schéma 6 : Mécanismes susceptibles d'expliquer le climat froid au Permien



# Schéma 5 : Mécanismes susceptibles d'expliquer le climat froid au Carbonifère

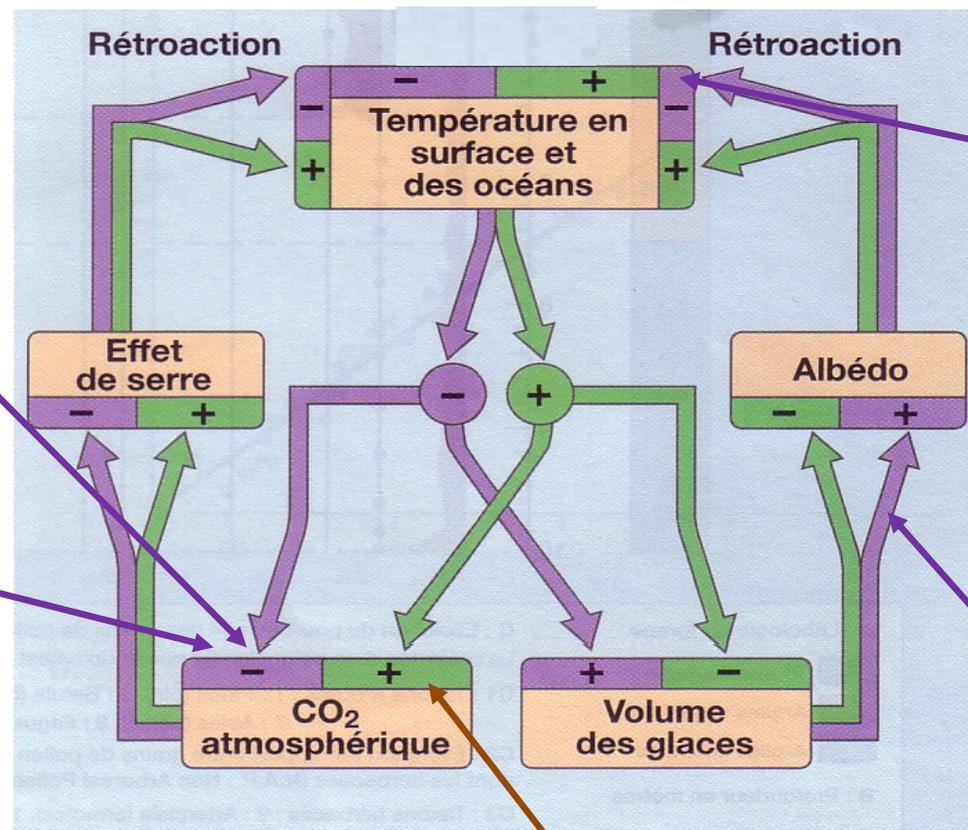


# Bilan des variations climatiques du Paléozoïque au Cénozoïque

- Refroidissement du cénozoïque
- Hausse de température au Crétacé
- Glaciation Carbonifère-Permienne

**Permo-carbonifère /**  
Fossilisation importante de la matière organique (grands gisements carbonés)

**Cénozoïque et Permo-carbonifère /**  
Altération des matériaux continentaux des chaînes de montagne



**Cénozoïque /**  
création d'un courant circumpolaire Antarctique qui refroidit les 2/3 sud de l'océan mondial

**Cénozoïque /**  
variation de la position des continents : l'Antarctique se sépare de l'Australie et de l'Amérique du sud

**Crétacé /**

Activité accrue des dorsales océaniques

# Schéma Bilan : Mécanismes susceptibles d'expliquer les variations climatiques à l'échelle globale

