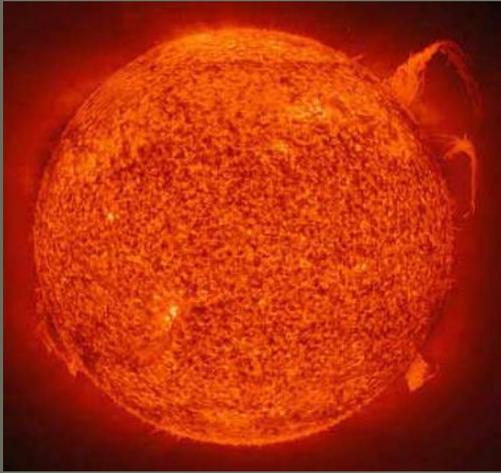


# Les variations climatiques au Quaternaire

- I. Les intérêts de cette étude
- II. Les indices des variations climatiques
- III. La nature des variations climatiques
- IV. Les causes des variations climatiques

## **IV . Les causes des variations climatiques**

# Qu'est-ce qui peut bien faire varier le climat ?

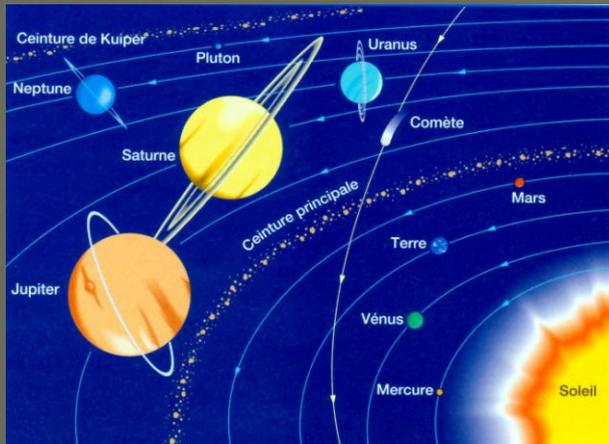


△ de l'activité du soleil ?



△ de la position des continents ?

Autres facteurs ?



△ de l'orbite de la Terre ?



△ de la composition de l'atmosphère ?

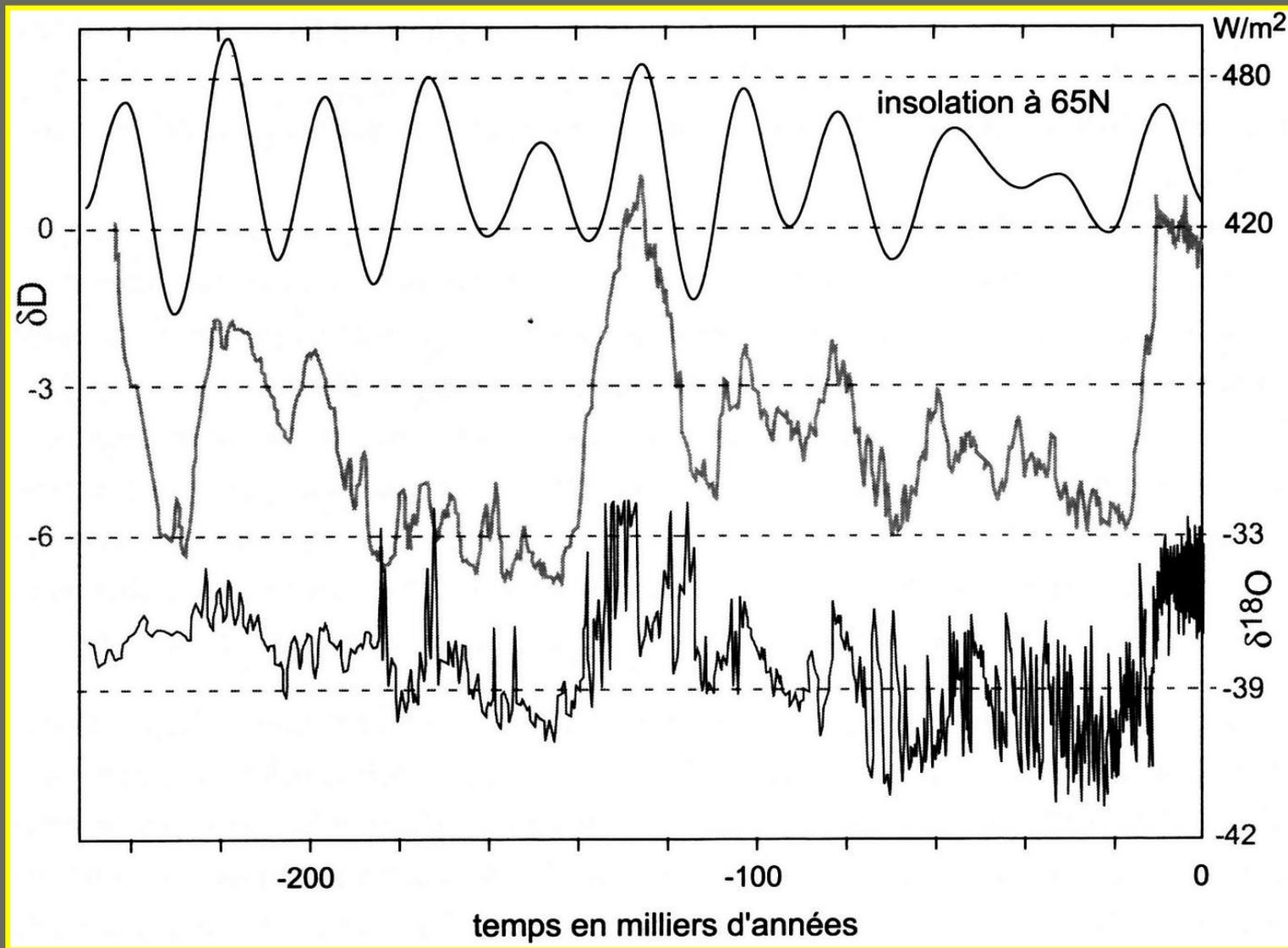
L'effet de serre ?

# **IV . Les causes des variations climatiques**

## **1. La variation périodique des paramètres orbitaux**

# Variations de l'insolation et de la température à l'échelle du Globe

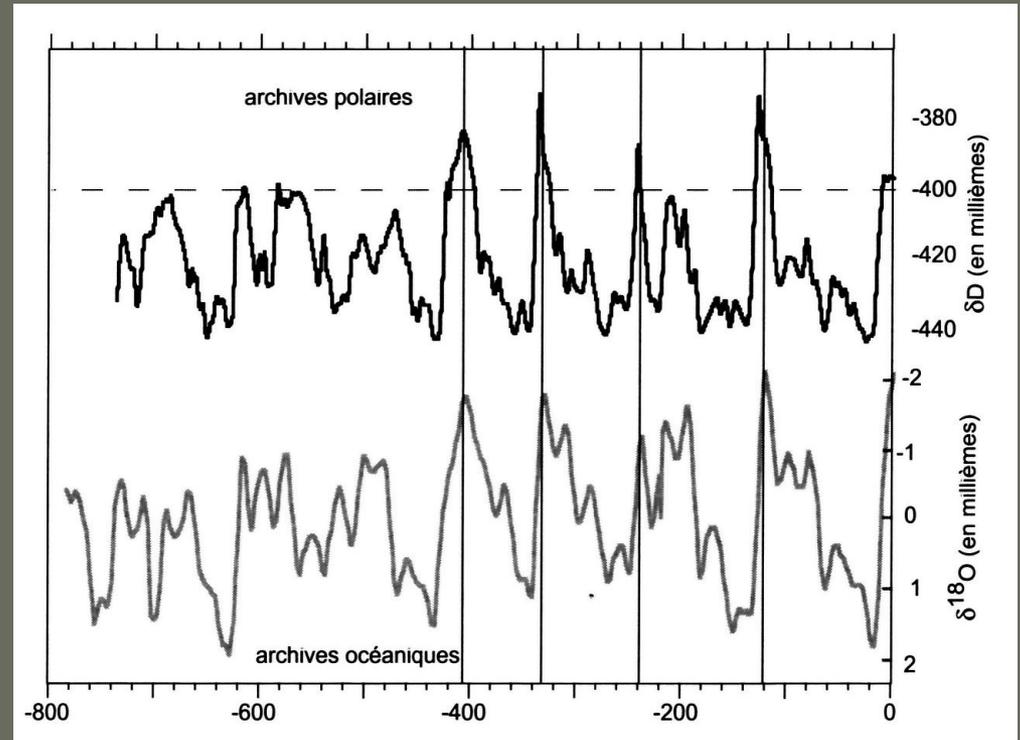
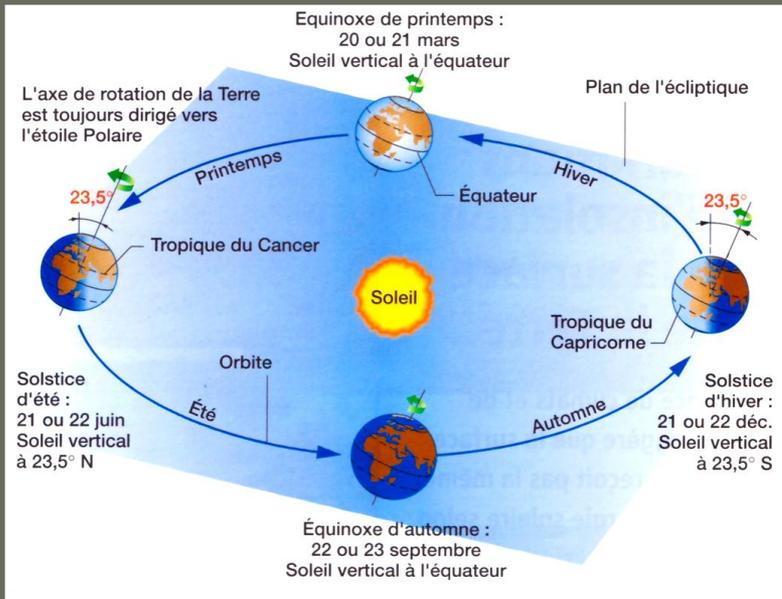
Un parallélisme plus ou moins étroit



# Une idée de mathématicien : la théorie astronomique du climat



Milutin Milankovitch



## Les variations climatiques du quaternaire

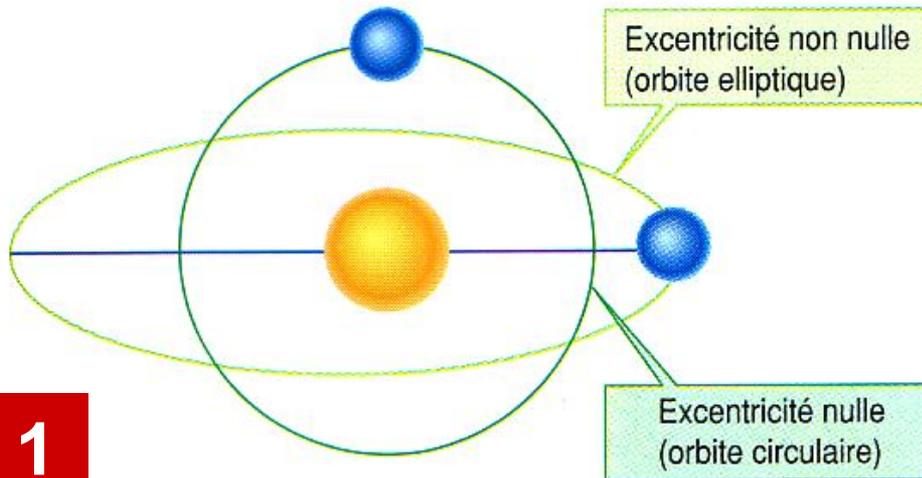
= des modifications cycliques liées aux variations périodiques de 3 paramètres orbitaux

## Les saisons = variations périodiques du climat

directement liées aux caractéristiques du mouvement de rotation de la Terre autour du soleil.

# Variations de 3 paramètres orbitaux

Changement d'excentricité  
de l'orbite de la Terre



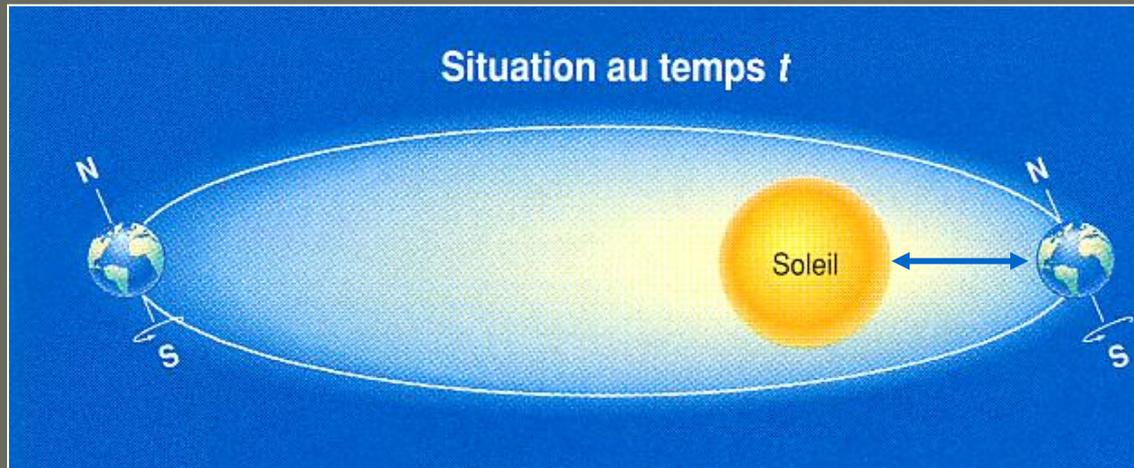
1

L'obliquité de la Terre  
et ses variations

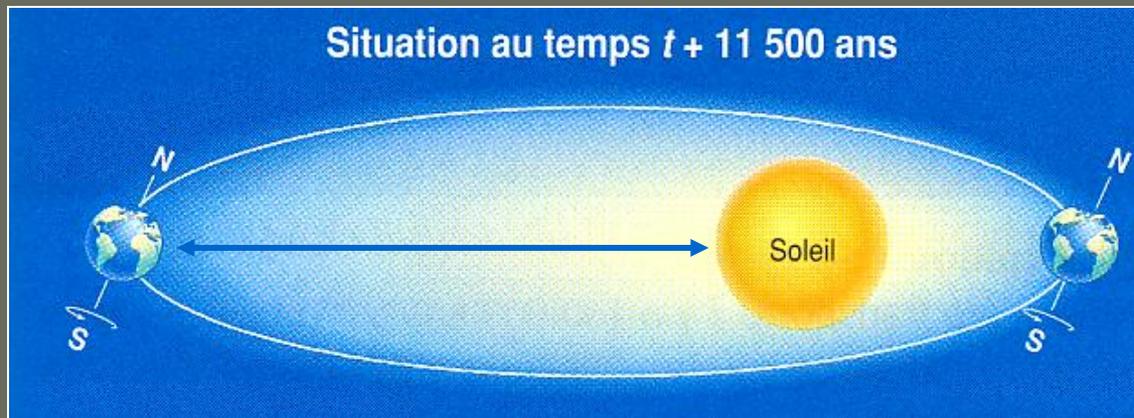


2

### 3 Précession des équinoxes

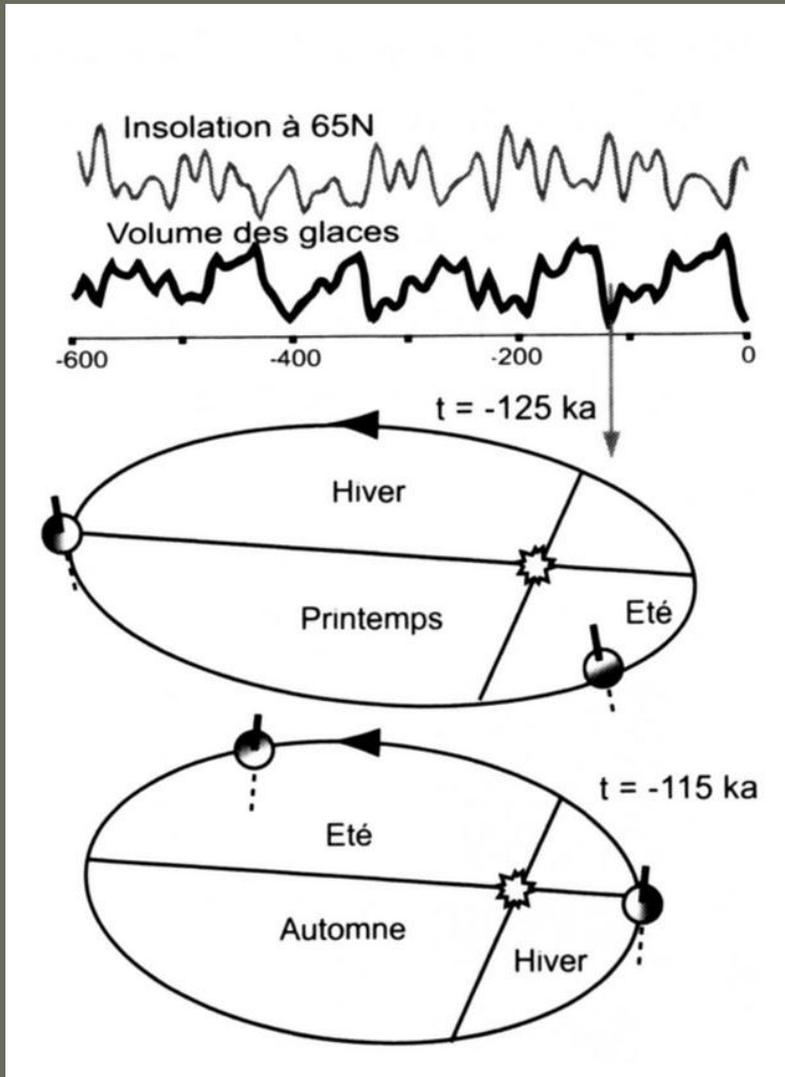


Quand l'orbite de la Terre est très elliptique, la position d'un l'hémisphère, pendant l'été et l'hiver varie entre deux extrêmes : 1) l'hémisphère nord est **orienté vers le soleil (été) pendant que la Terre est proche du soleil** ;



2) 11 500 ans plus tard, l'été de l'hémisphère nord a lieu pendant que la Terre est loin du soleil (cas actuel)

# Quand l'été devient trop froid une glaciation commence



## Il y a 125 000 ans ( dernier interglaciaire):

- excentricité importante ;
- axe de rotation un peu plus incliné;
- l'été se produit lorsque la Terre passe près du soleil

**L'insolation d'été , plus forte de 13% , est suffisante pour fondre les glaces formées en hiver**

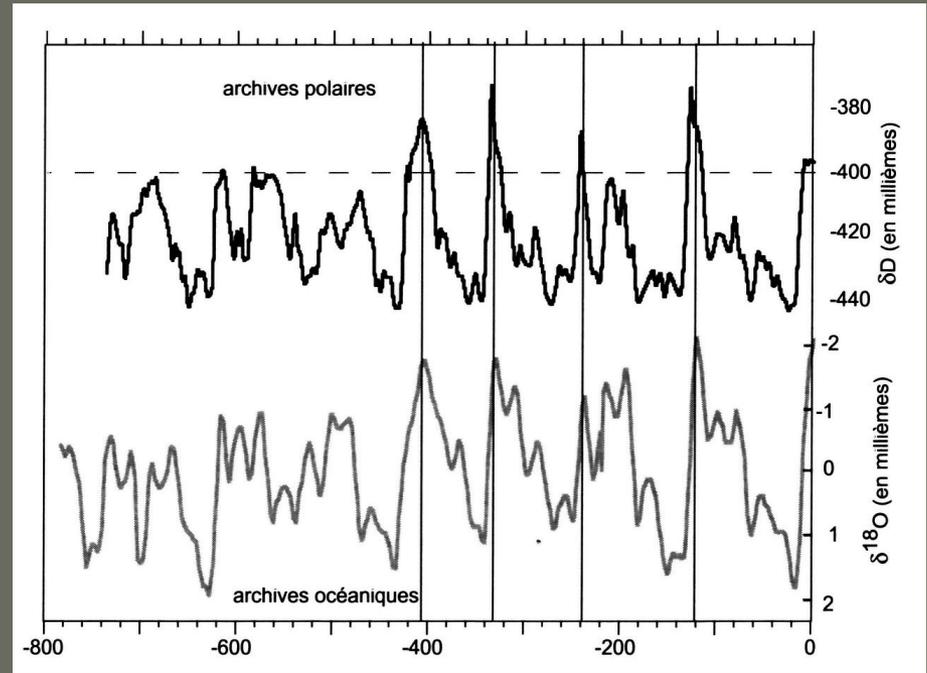
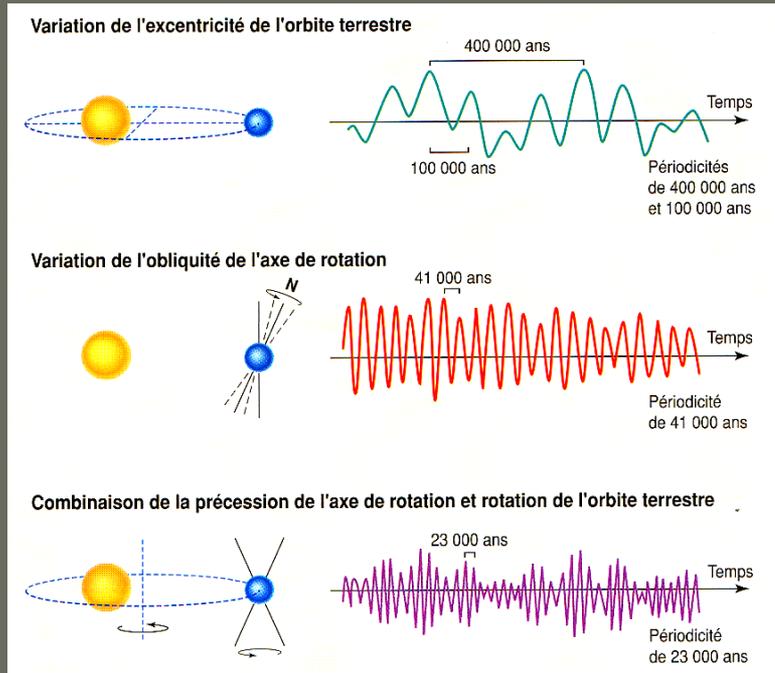
## Il y a 115 000 ans :

- Excentricité plus faible ;
- axe de rotation moins incliné;
- l'été se produit lorsque la Terre s'éloigne du soleil

L'insolation d'été , inférieure de 9% par rapport à aujourd'hui .Les glaces accumulées en hiver ne reçoivent pas assez d'énergie pour fondre en été.

**Une glaciation commence**

# Variations périodiques des paramètres orbitaux et du climat



Excentricité, inclinaison et précession combinées font que l'insolation en un point donné de la Terre se modifie périodiquement (même position spatiale au bout de 100 ka).

Les températures données par les archives polaires et océaniques laissent apparaître les mêmes périodicités.

**Problème** : En fonction des variations des paramètres orbitaux, l'insolation moyenne annuelle varie entre 342,5 et 343,1 W/m<sup>2</sup> (0,2 %) ce qui **devrait se traduire par des variations de température de la Terre de 0,5°C au maximum !**

## **IV. Les causes des variations climatiques**

### **2 . Un amplificateur : l'effet de serre**

# Bilan radiatif de la Terre au sommet de l'atmosphère

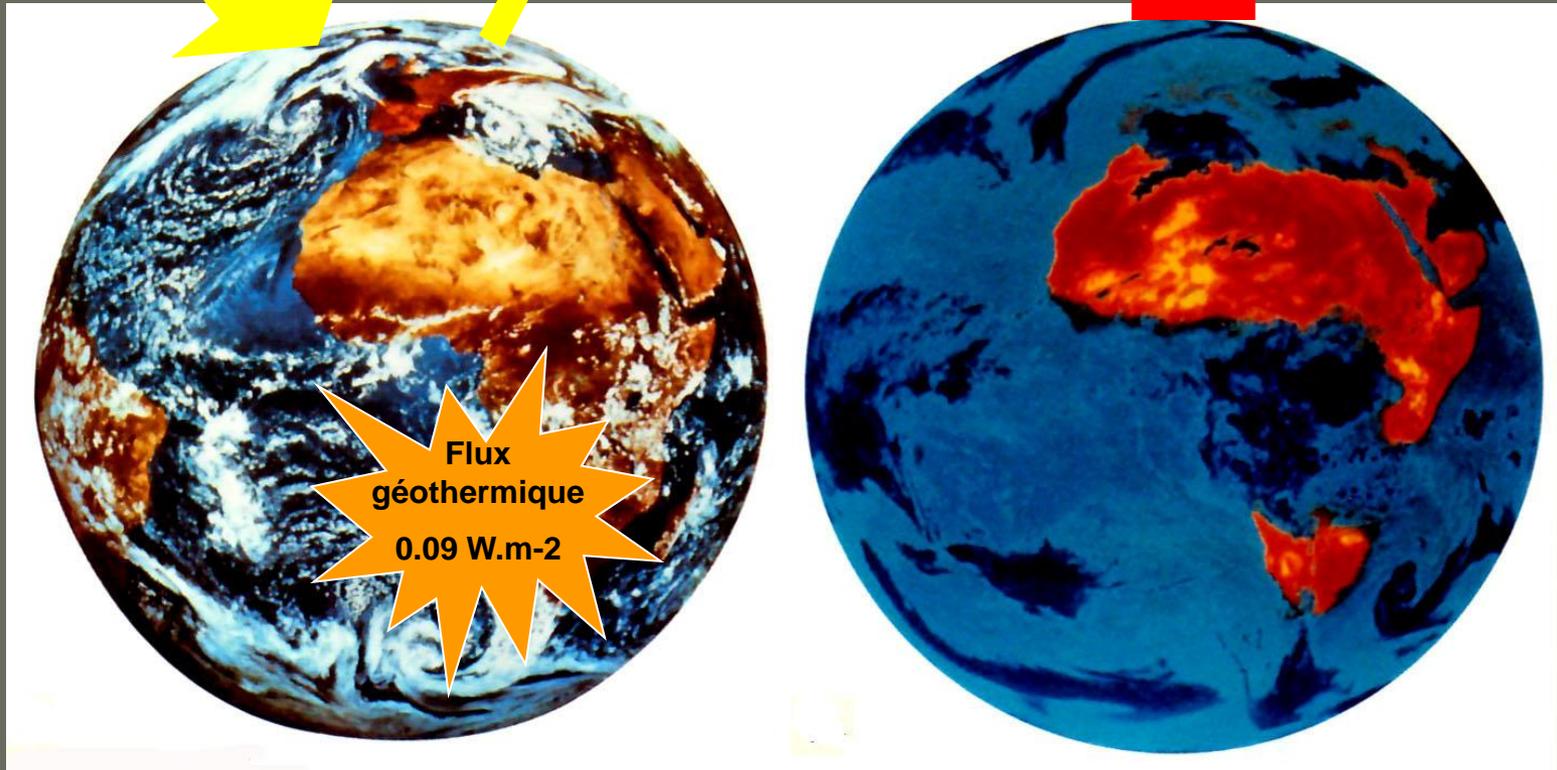
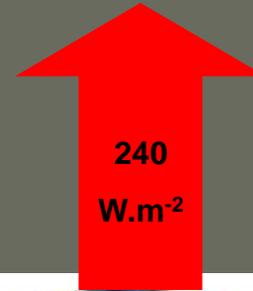
Rayonnement solaire incident



Rayonnement solaire réfléchi



Rayonnement thermique IR



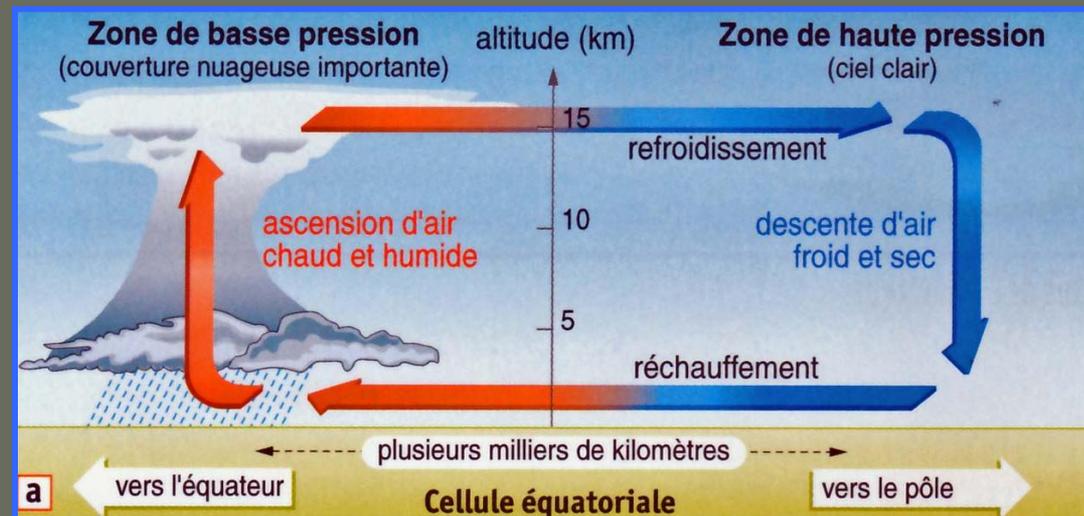
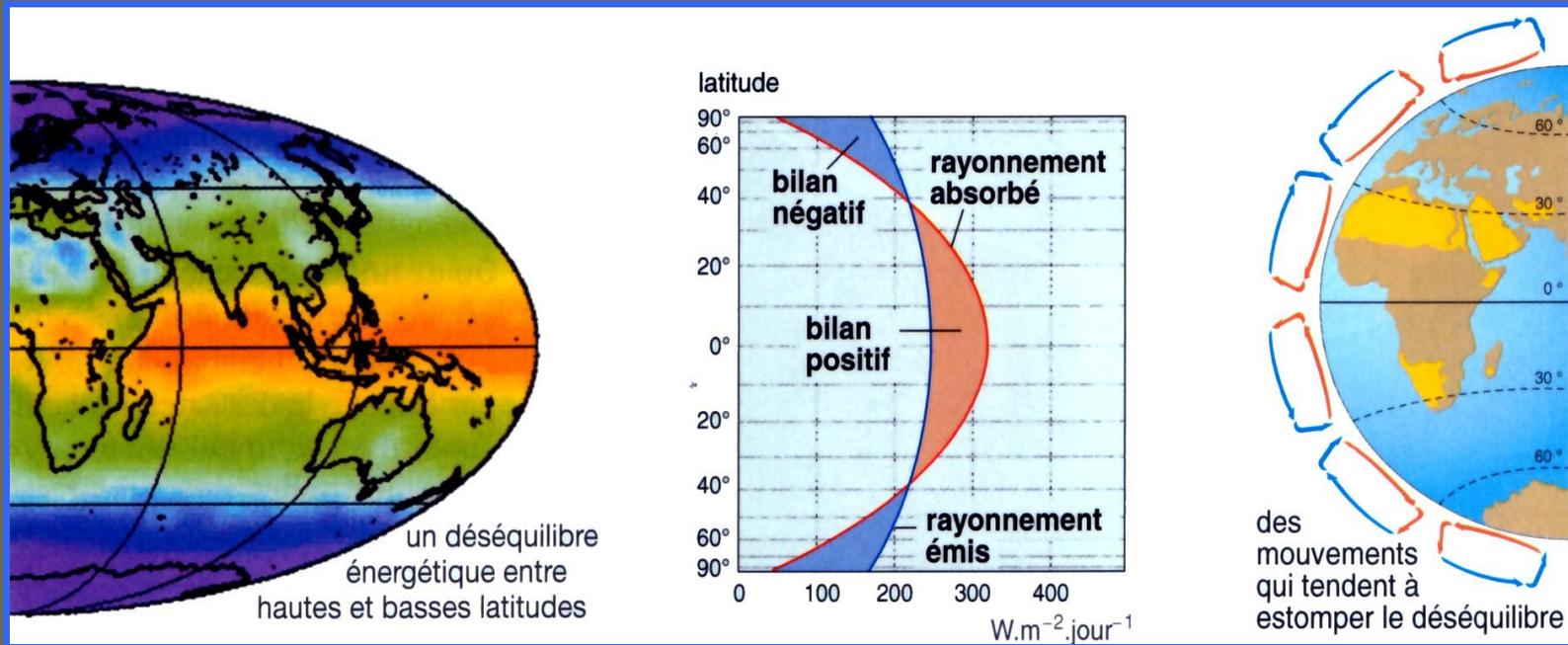
342  
W.m<sup>-2</sup>

102  
W.m<sup>-2</sup>

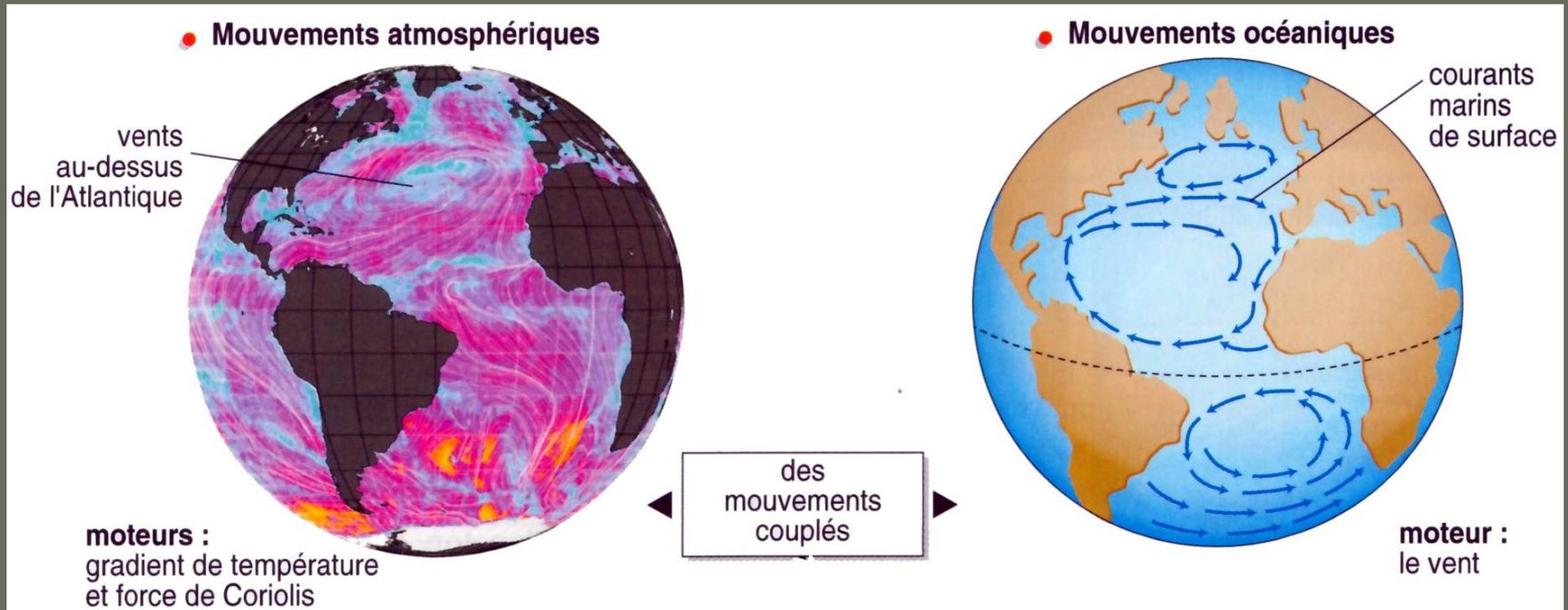
240  
W.m<sup>-2</sup>

Flux  
géothermique  
0.09 W.m-2

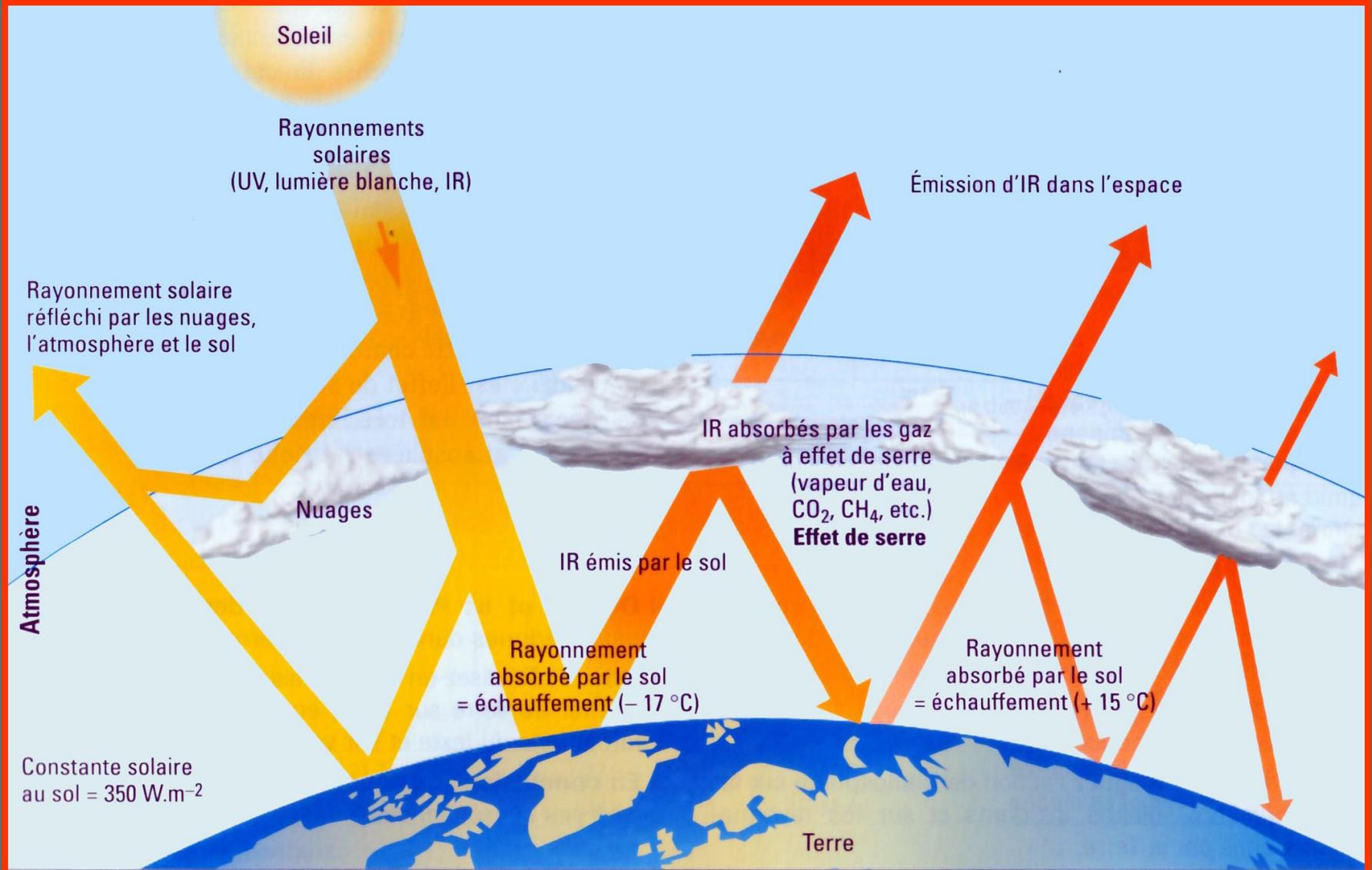
# Énergie solaire - mouvements atmosphériques et océaniques



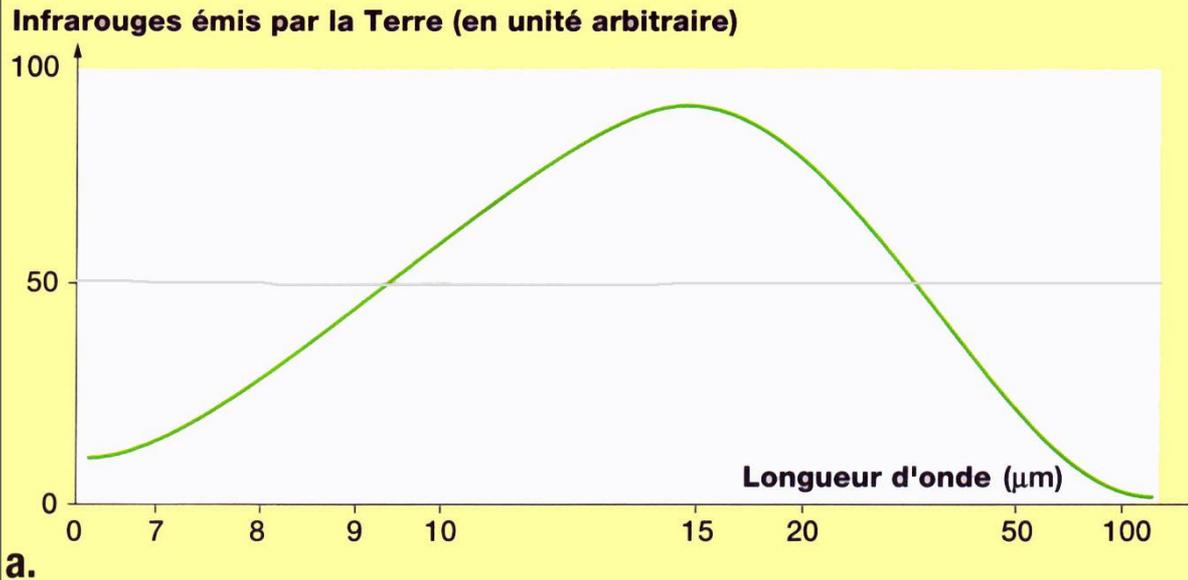
# Couplage entre mouvements atmosphériques et océaniques



# Rayonnement solaire et effet de serre

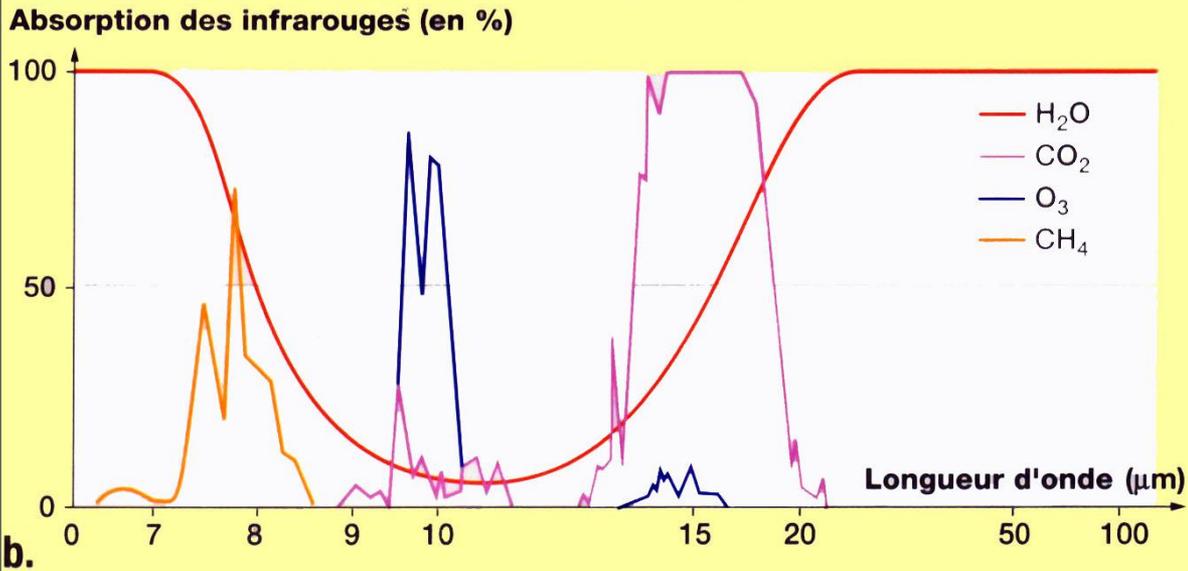


# Absorption des infrarouges par les GES



Ordre d'importance des GES

1. H<sub>2</sub>O
2. CO<sub>2</sub>
3. CH<sub>4</sub>
4. N<sub>2</sub>O
5. O<sub>3</sub>
6. CFC ou HFC



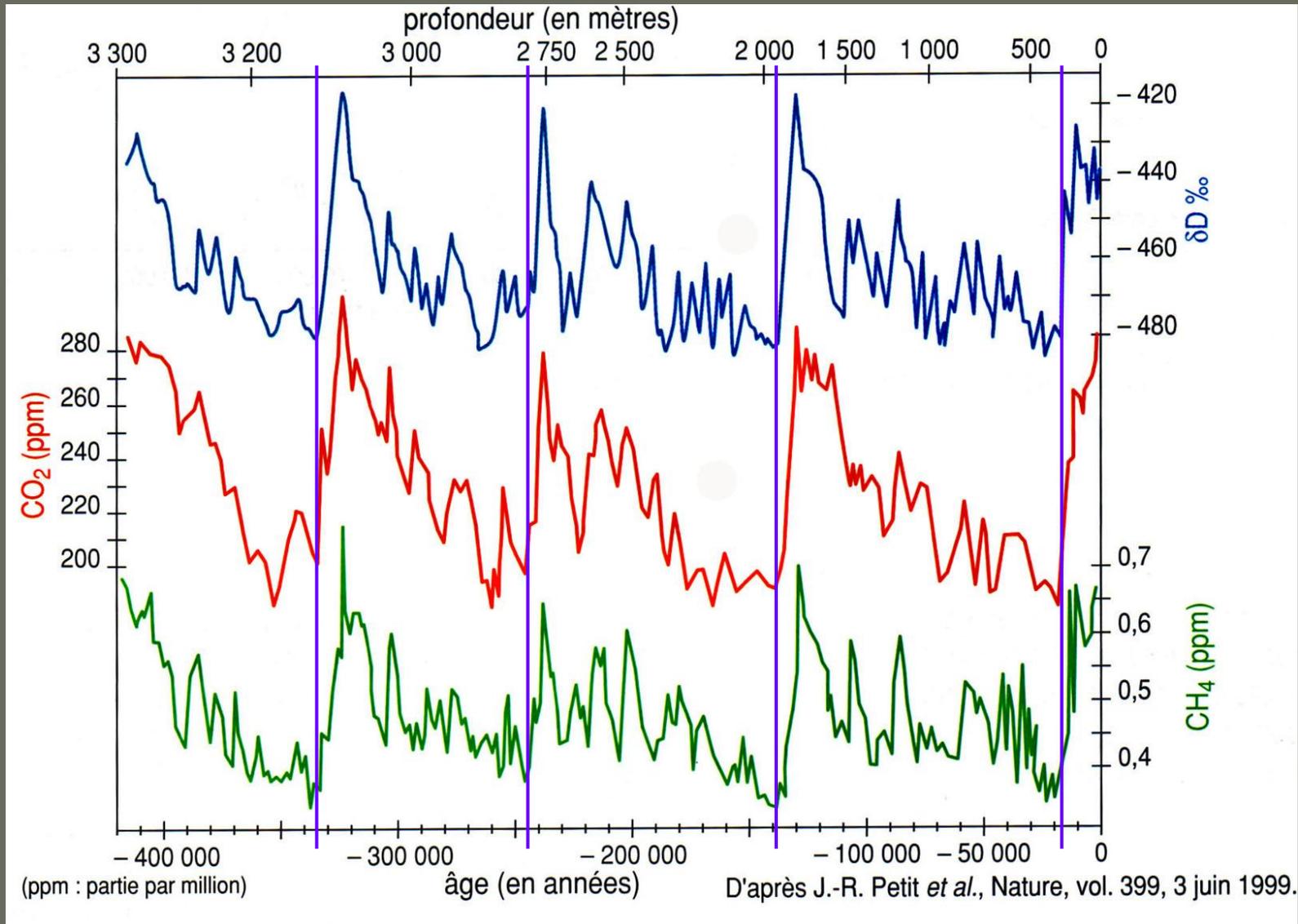
Temps de résidence dans l'atmosphère

CO<sub>2</sub> : 50 à 250 ans

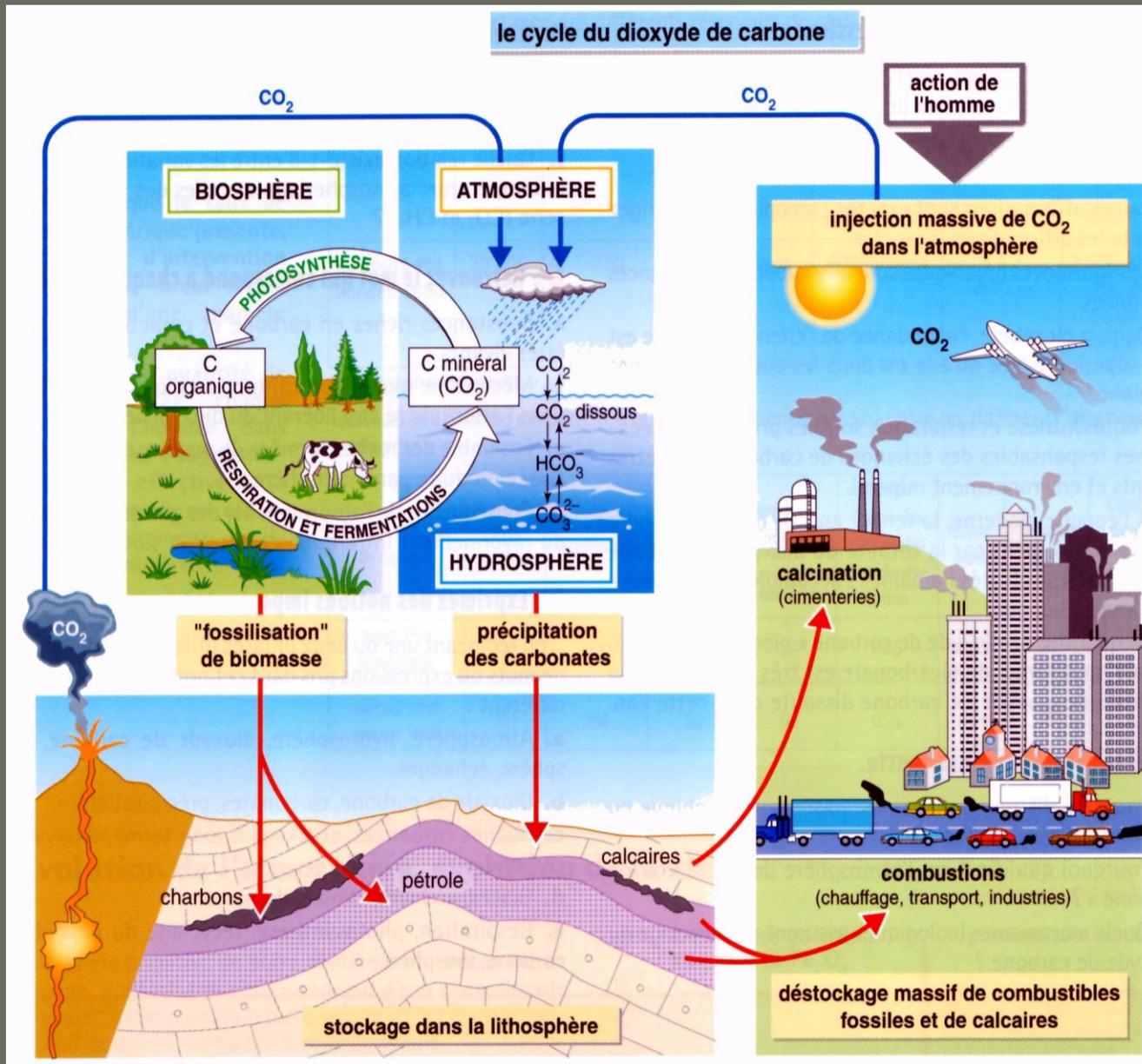
CH<sub>4</sub> : 10 ans

N<sub>2</sub>O : 100 ans

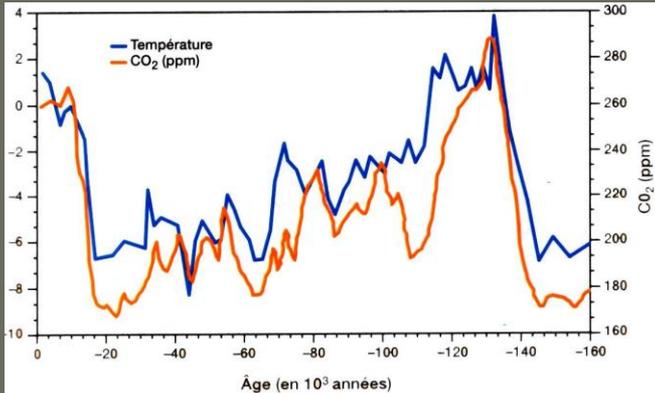
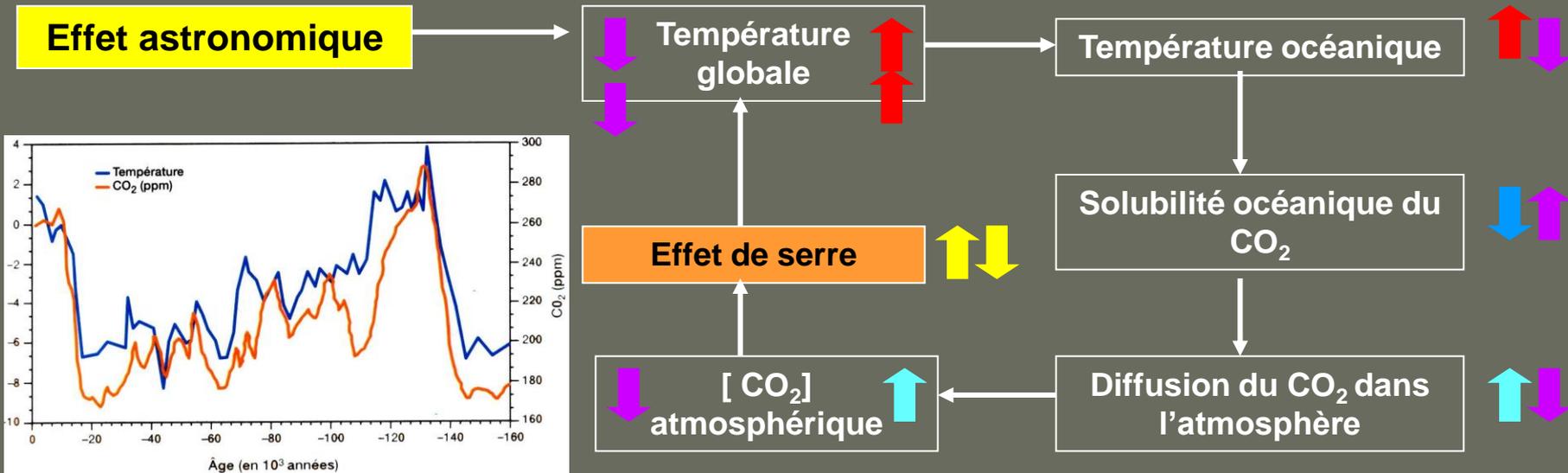
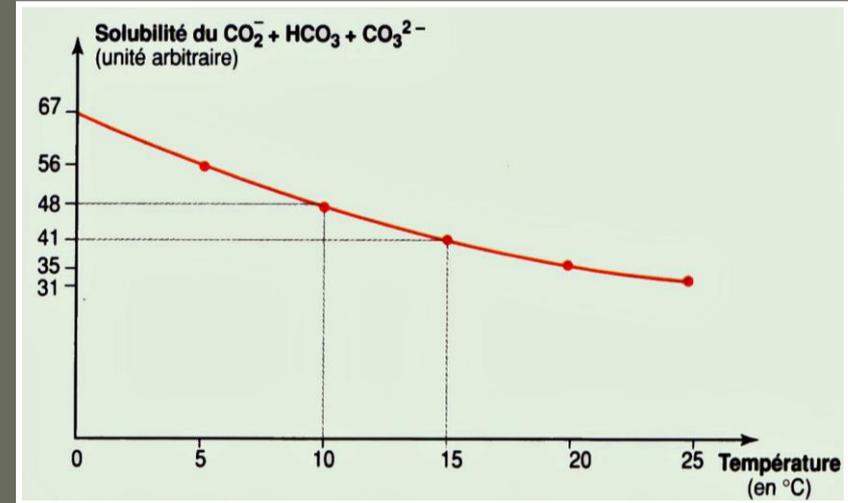
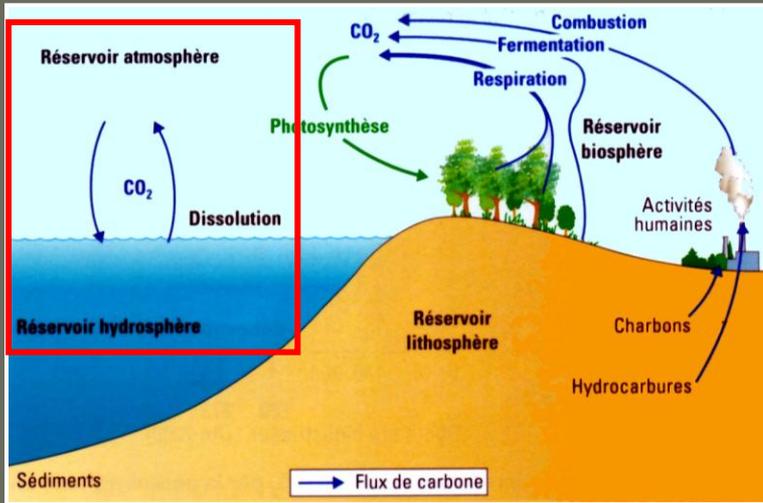
# Archives glaciaires : Les taux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> depuis 400 ka



# Le cycle du carbone et les sources du CO<sub>2</sub>

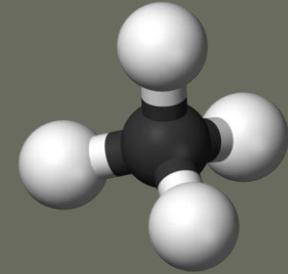


# Un facteur amplificateur de l'effet astronomique: le CO<sub>2</sub>



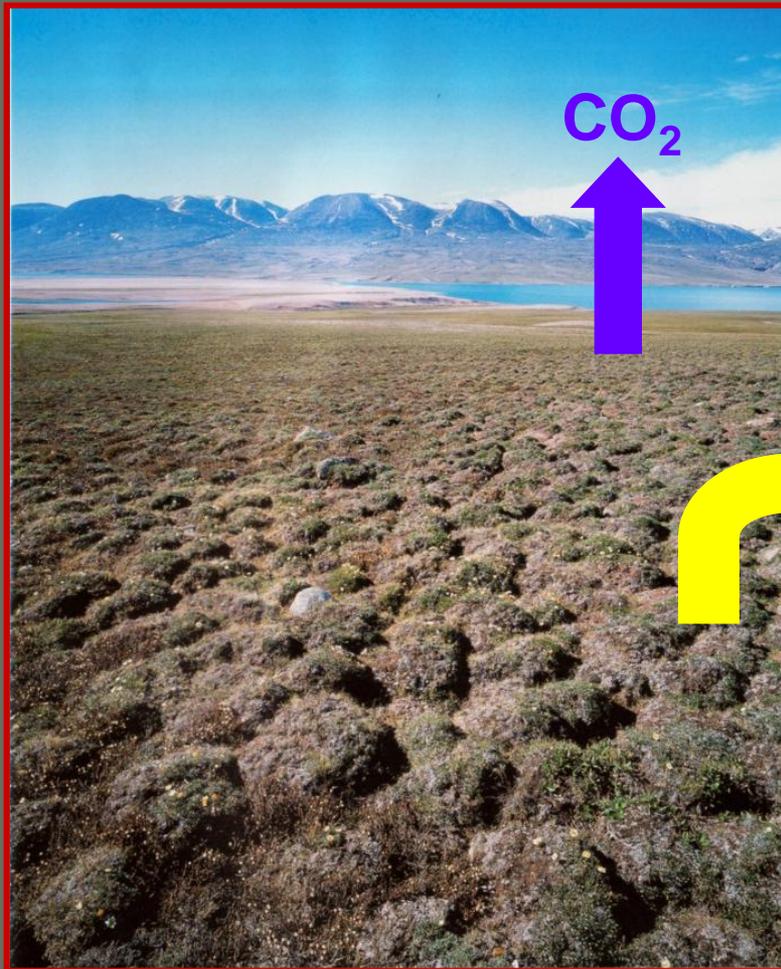
**Une boucle de rétroaction positive**

# Sources du méthane

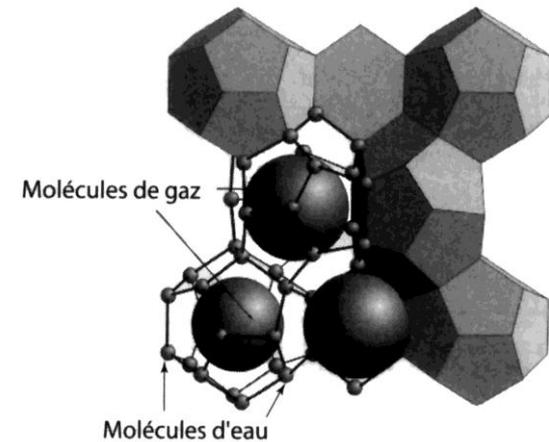


- Clathrates ( 4%) ( hydrates contenant du méthane ) des sédiments marins , des permafrosts lors d'une augmentation de température;
- Zones humides ( 32%) : bactéries méthanogènes des marais , mangroves , rizières;
- Énergies fossiles( 21%) : gaz naturel composé de 90% de méthane;
- Ruminants ( 16%) : fermentation gastro-entérique;
- Décomposition des déchets animaux et végétaux ( 10%);

# Dégel des permafrost : un déstockage massif de $\text{CO}_2$ et de $\text{CH}_4$



1 volume d'hydrate = 160 volumes de gaz libre



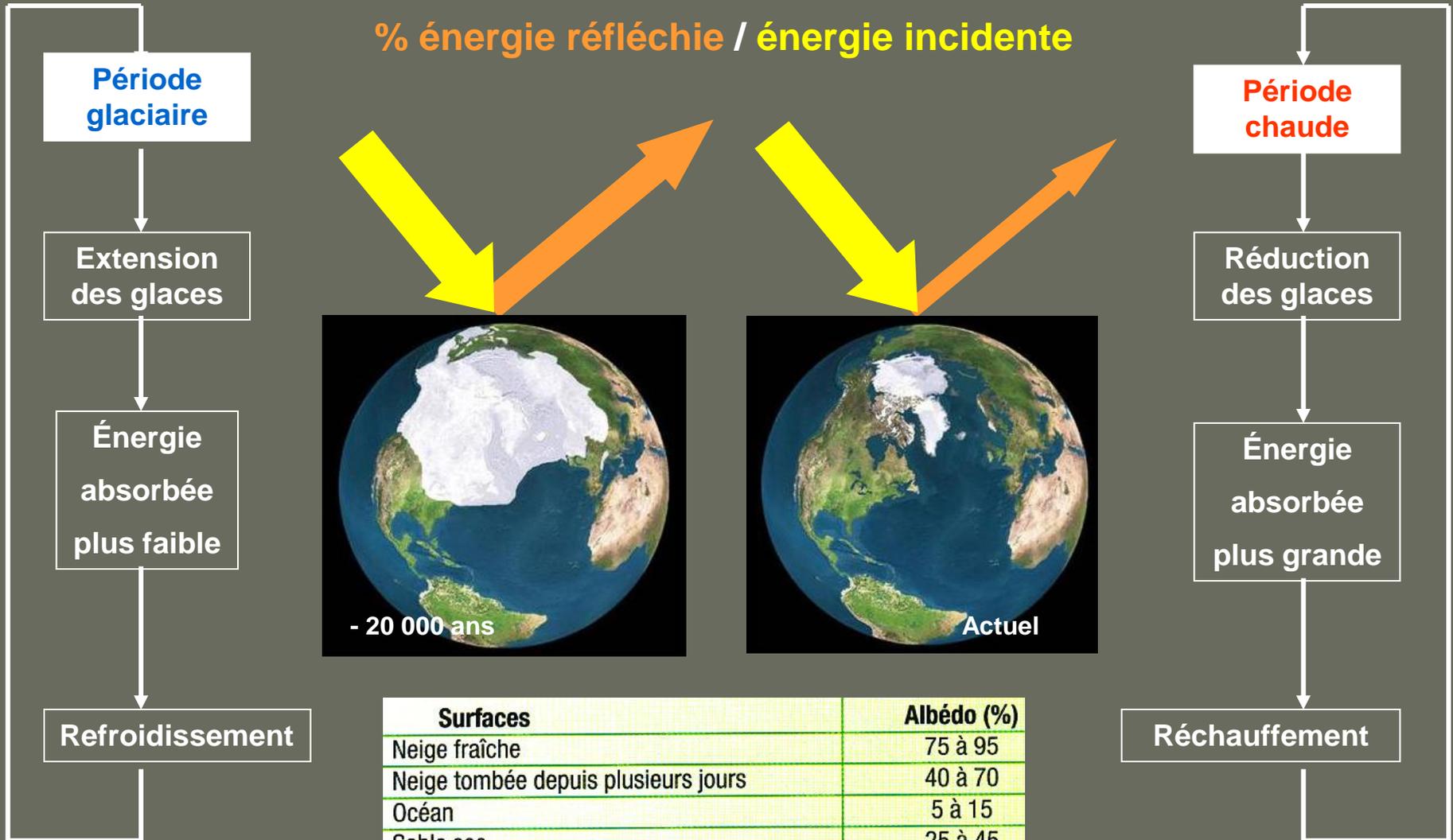
Structure et volumes des clathrates  
Structure d'un hydrate de méthane

(D'après Suess, 2002)

# **IV . Les causes des variations climatiques**

## **3. L'albédo : un autre facteur amplificateur**

# Le mécanisme amplificateur de l'albédo

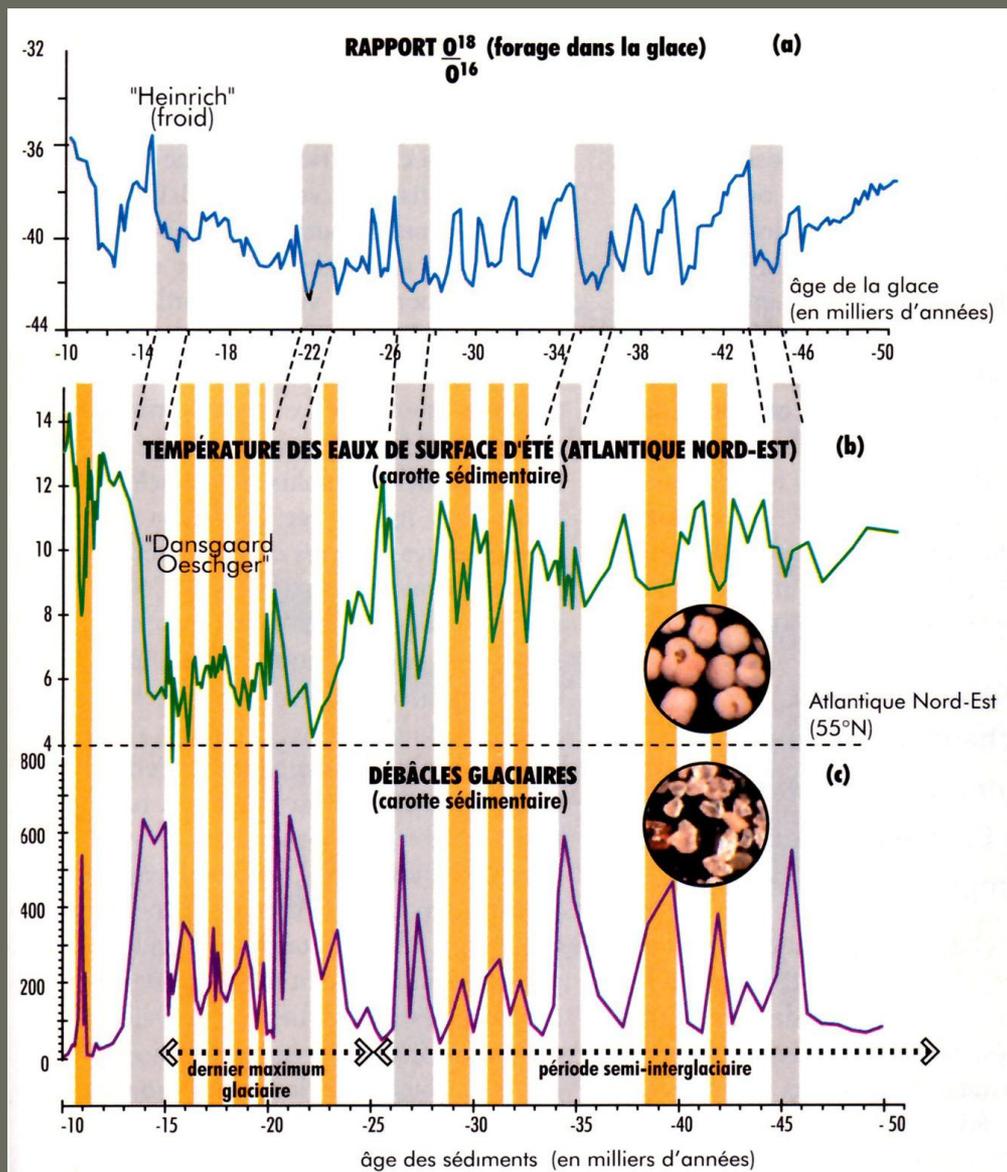


Surfaces	Albédo (%)
Neige fraîche	75 à 95
Neige tombée depuis plusieurs jours	40 à 70
Océan	5 à 15
Sable sec	25 à 45
Forêt tropicale	10
Forêt de conifères	5 à 15
Cultures	15 à 25

# **IV . Les causes des variations climatiques**

4. Débâcle glaciaire et modification des courants océaniques

# Coups de « chaud et froid » millénaires pendant le Würm



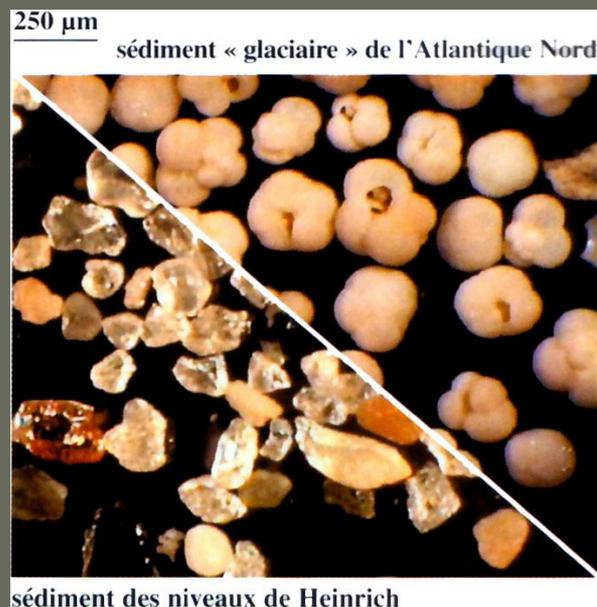
Température de l'air

Température des eaux de surface

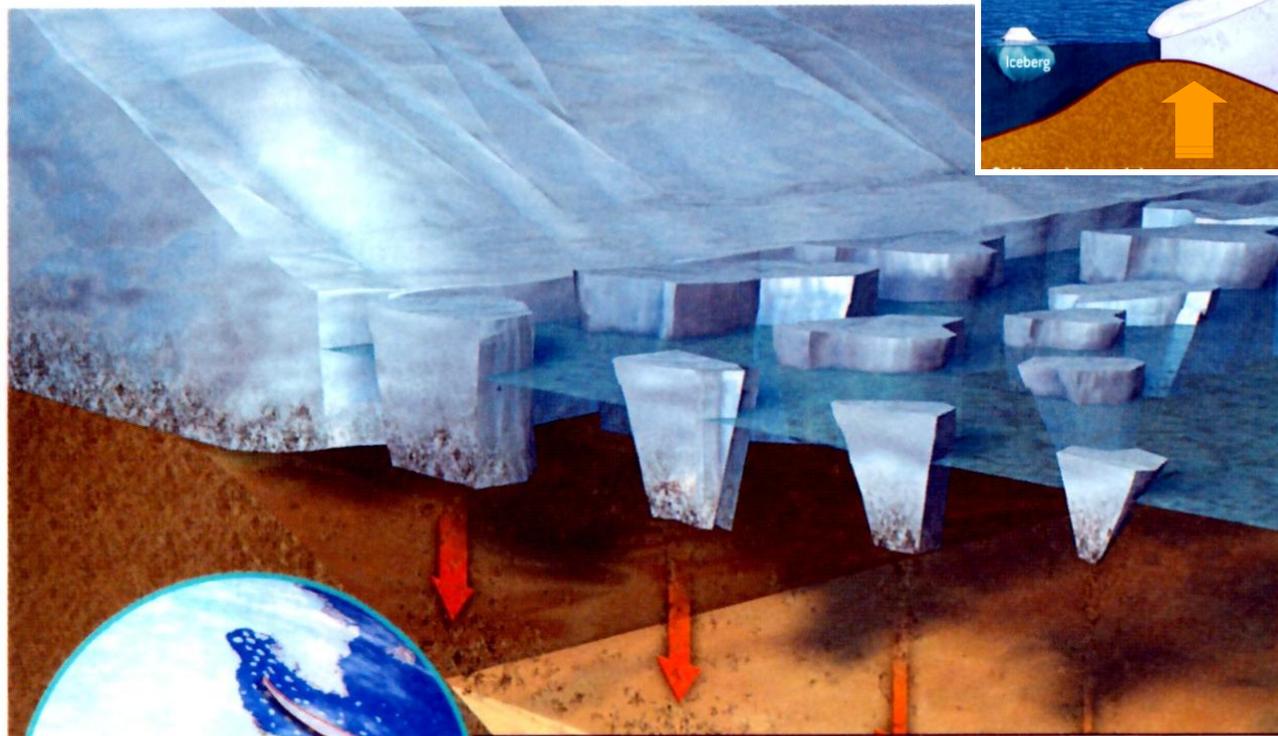
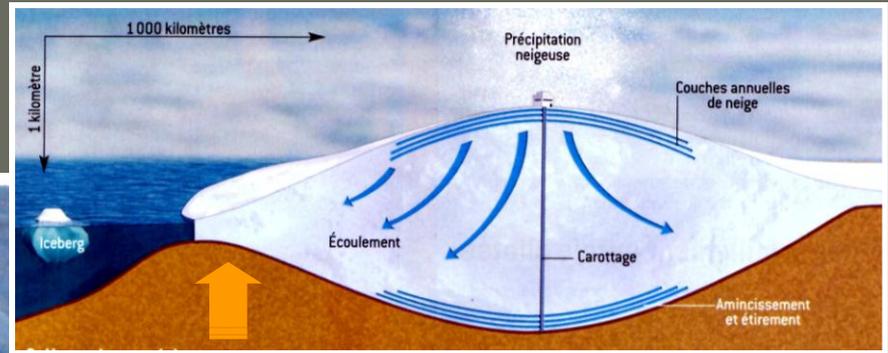
Des coups de froid : événements de Heinrich ;

Des coups de « chaud » : événements de Dansgaard

Débâcles glaciaires



# Débâcle glaciaire



L'énergie géothermique du socle rocheux bien que faible ( $0,09\text{W/m}^2$ ) fait fondre la base de la calotte glaciaire .

Près des côtes , la calotte glaciaire, déstabilisée mécaniquement , se disloque et déverse d'immenses icebergs dans l'océan.

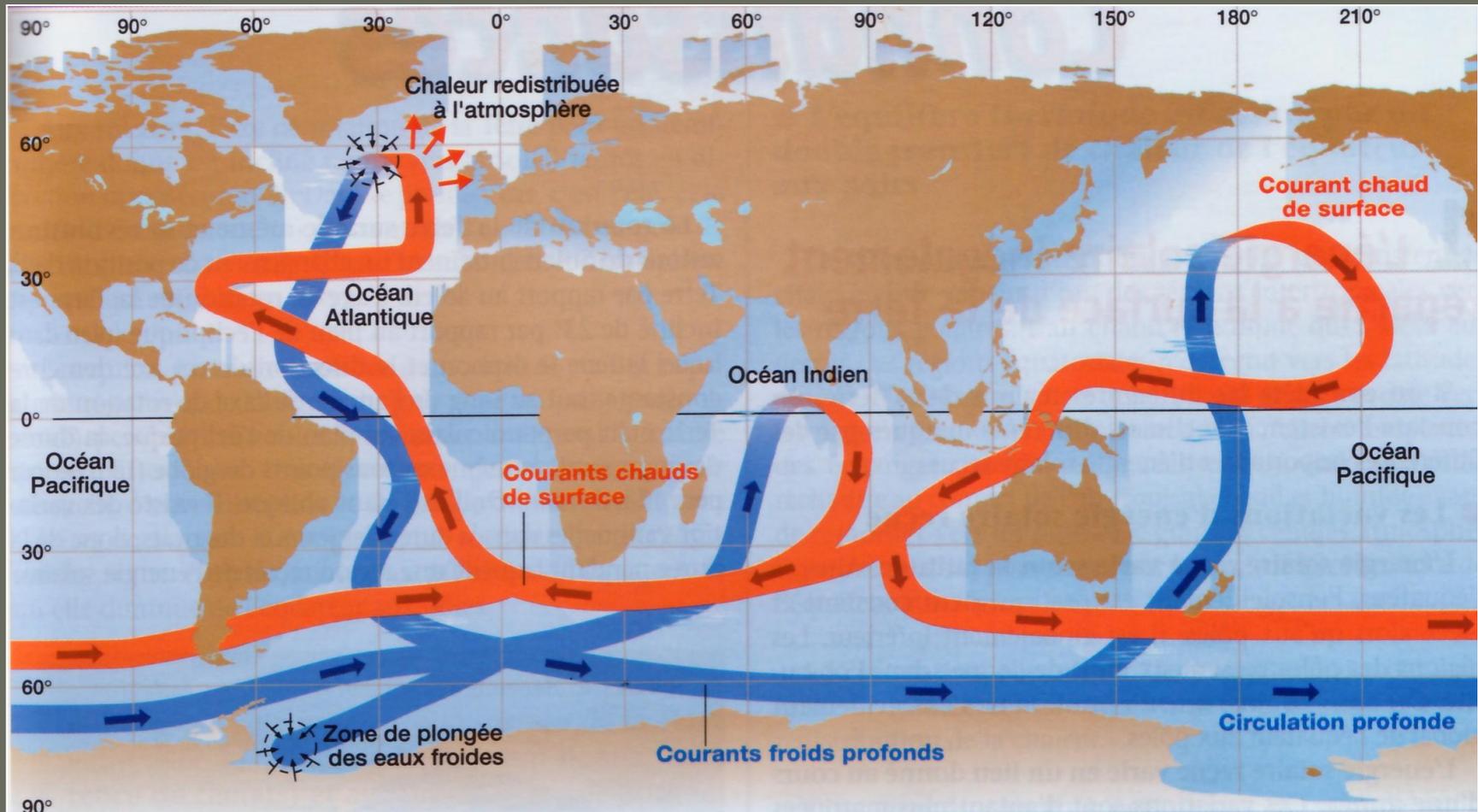
Ceux-ci viennent fondre jusqu'à la latitude de Londres où ils lâchent les débris ( grains de quartz) arrachés sur le continent

**LORS D'UNE DÉBÂCLE**, en se détachant de la calotte de glace (*ci-dessus*), les icebergs emportent avec eux des débris de socle rocheux. Ils les essaient ensuite sur les fonds océaniques de l'Atlantique Nord. Grâce à ces débris préservés dans les sédiments, il est possible de repérer les débâcles nommées événements de Heinrich (épisodes froids).



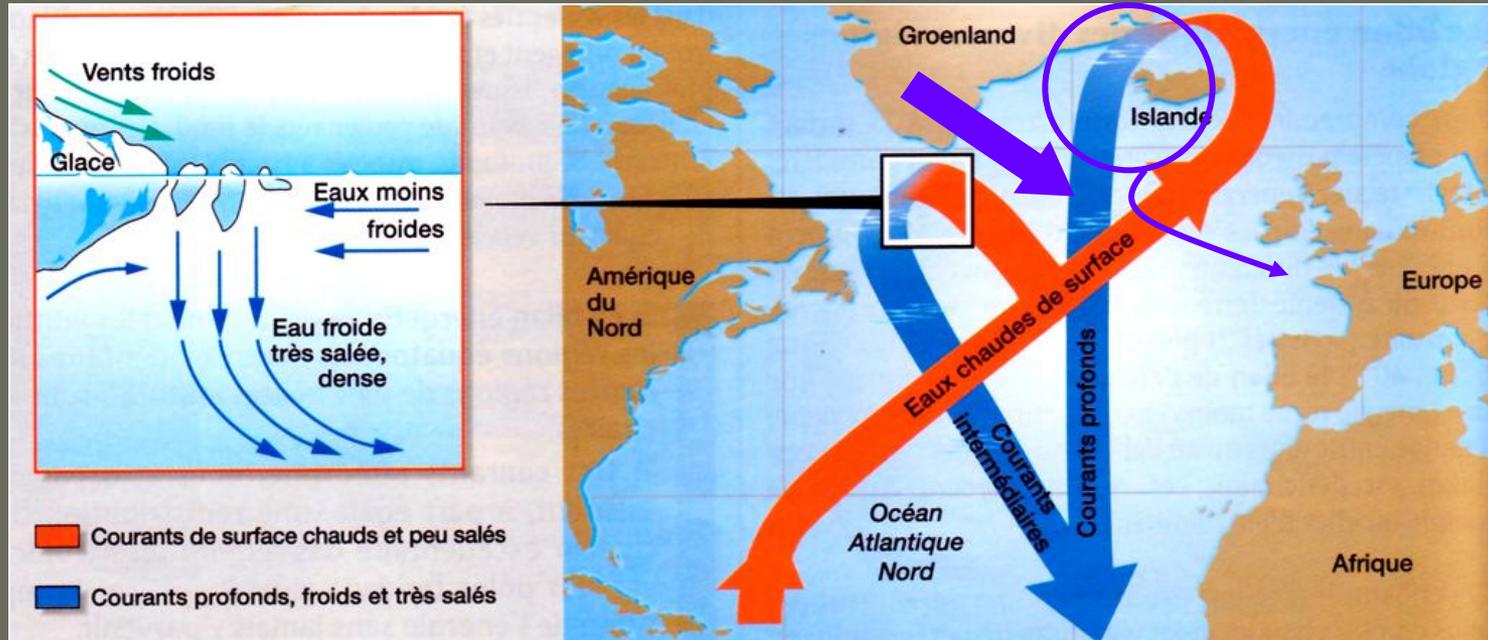
# Débâcle glaciaire et courants océaniques

## Circulation globale des eaux océaniques



Le mouvement global des courants océaniques : le conveyor belt

# Débâcle glaciaire et courants océaniques



Avec la fonte des icebergs libérés par la calotte glaciaire, l'océan se refroidit et se couvre d'une nappe d'eau douce, très froide (moins dense que l'eau salée), qui modifie le point de plongée des courants. L'océan ne réchauffe plus cette région, ce qui renforce le refroidissement global.

# **IV . Les causes des variations climatiques**

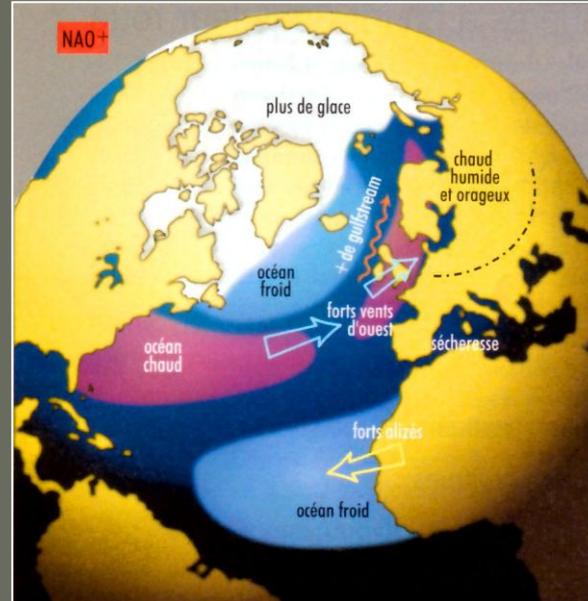
## **5. Le balancier de l'Atlantique Nord**

# L'oscillation Nord-Atlantique ( Le NAO)

Le NAO est un véritable balancier atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression islandaise , les 2 pôles climatiques de l'océan Atlantique Nord. Le NAO oscille entre 2 modes : NAO+ et NAO-.



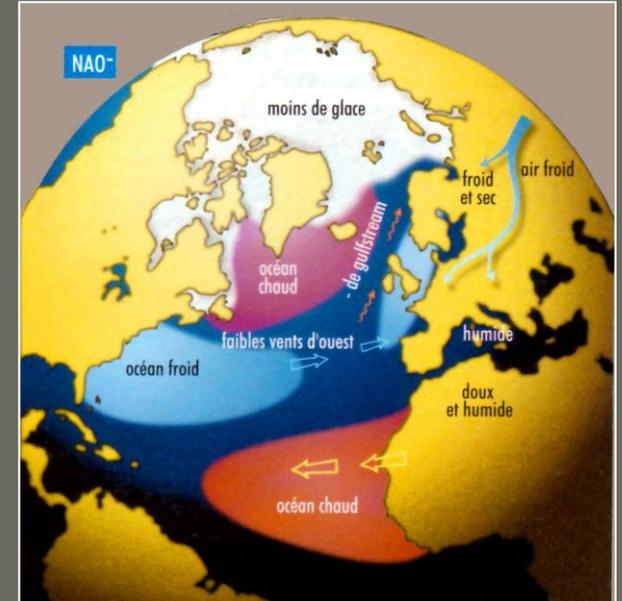
L'hiver 1962-1963 fait partie d'une série d'hivers rigoureux en Europe , de 1953 à 1974.



La différence de P atmosphérique entre l'Islande et les Açores est plus forte que la normale .

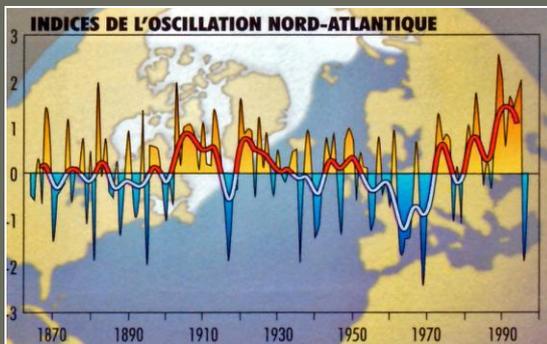
Les vents d'Ouest qui soufflent vers le continent sont renforcés.

En Europe du nord , l'hiver est alors doux , humide et venté , alors qu'en Méditerranée il est plus sec



La différence de P atmosphérique entre l'Islande et les Açores est réduite .

Les vents d'Ouest étant affaiblis, des masses d'air froid arrivent de Sibérie : au Nord et au centre de l'Europe , l'hiver est froid et sec.



# **IV . Les causes des variations climatiques**

6. L'impact des activités humaines sur le climat

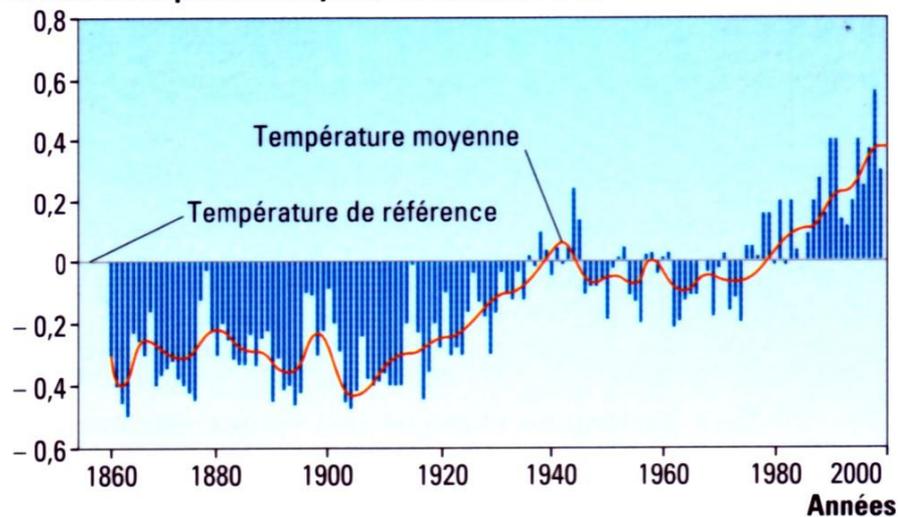
# L'impact des activités humaines sur le climat



La température moyenne de la Terre a augmenté de 0,6°C depuis 120 ans !

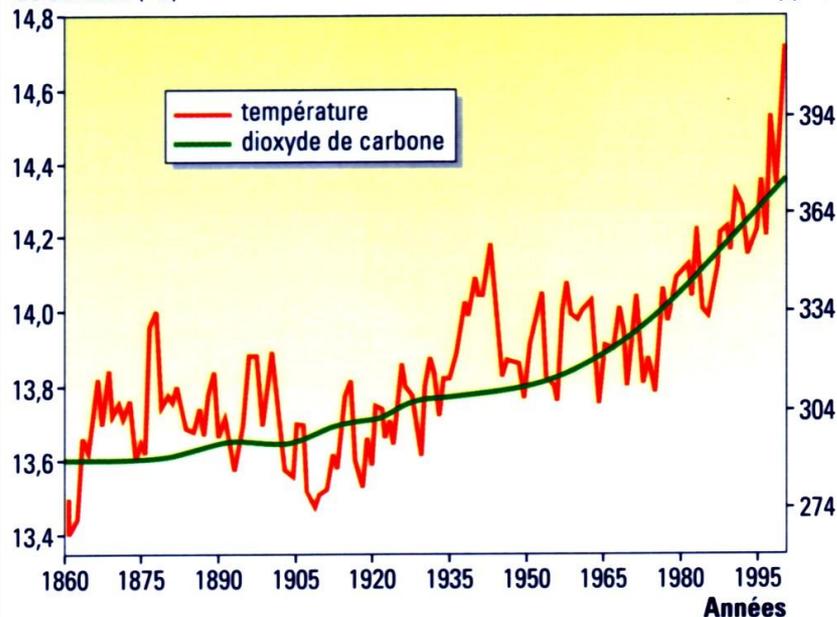
## Le CO<sub>2</sub> et les autres GES sont mis en cause

Écart à la température moyenne de référence (°C)



**Variations de la température moyenne de la Terre depuis 1860 par rapport à une température moyenne de référence (1961-1990).** La température moyenne a augmenté de 0,6 °C au cours des 120 dernières années; la décennie 90 fut la plus chaude et 1998, l'année la plus caniculaire depuis 1860. Le réchauffement du xx<sup>e</sup> siècle est le plus marqué depuis 1 000 ans.

Température globale de surface (°C)



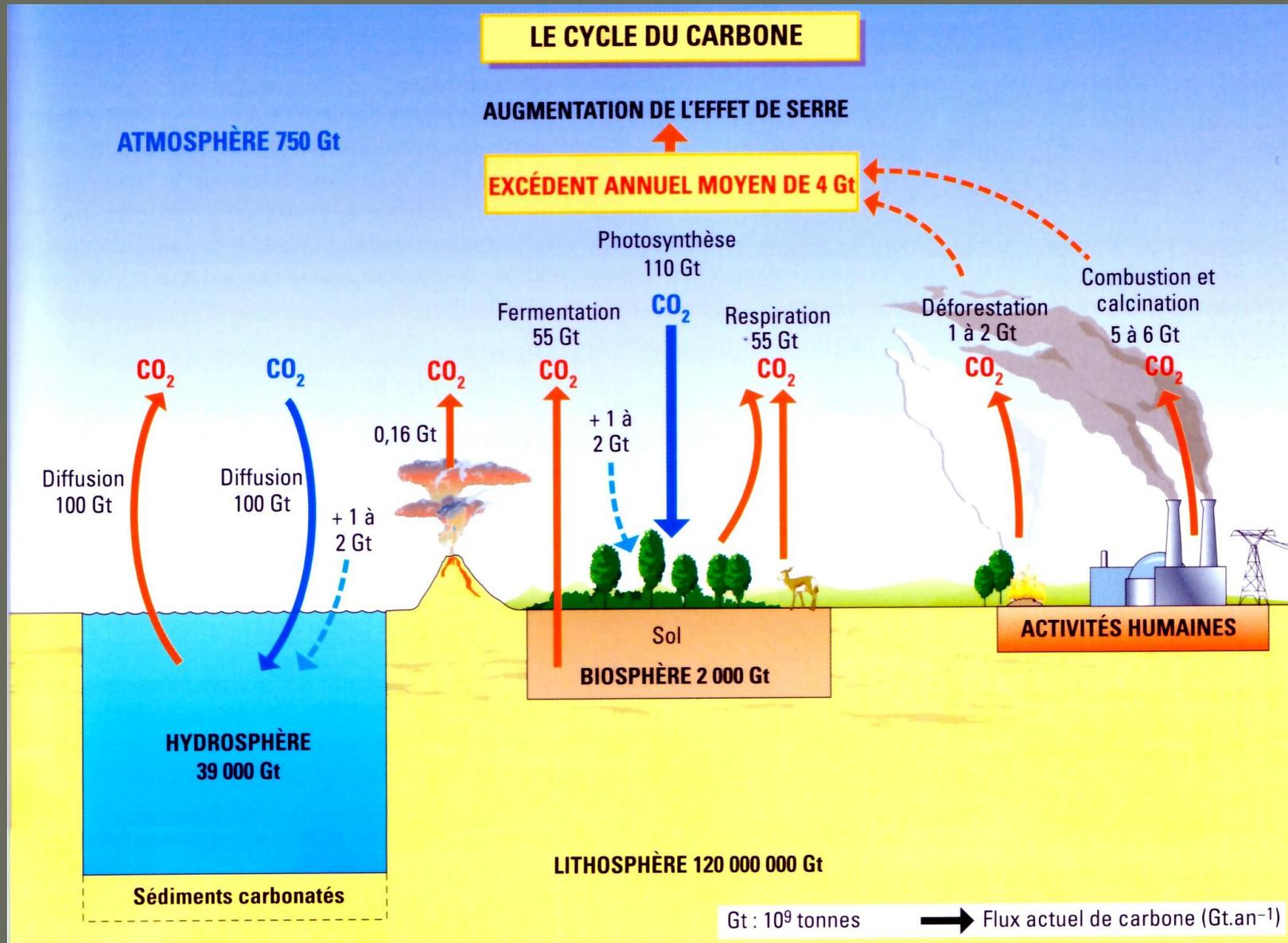
**Les variations de température et de CO<sub>2</sub> depuis 1860.**

# Augmentation du taux des GES par les activités humaines

<b>Gaz à effet de serre</b>	<b>Rejets par activités humaines, en % depuis 1850</b>	<b>Augmentation en % par an</b>	<b>Durée de vie</b>	<b>Contribution à l'augmentation* de l'effet de serre depuis 1850</b>
CO <sub>2</sub>	+ 30%	0,4	100 ans	65%
CH <sub>4</sub>	+ 150%	0,6	12 ans	19%
N <sub>2</sub> O	+ 15%	0,25	120 ans	6%
HCFC*	Usage récent	0,5	12 ans	0,9%
CFC*	Usage récent	interdits depuis 1987	100 ans	9%

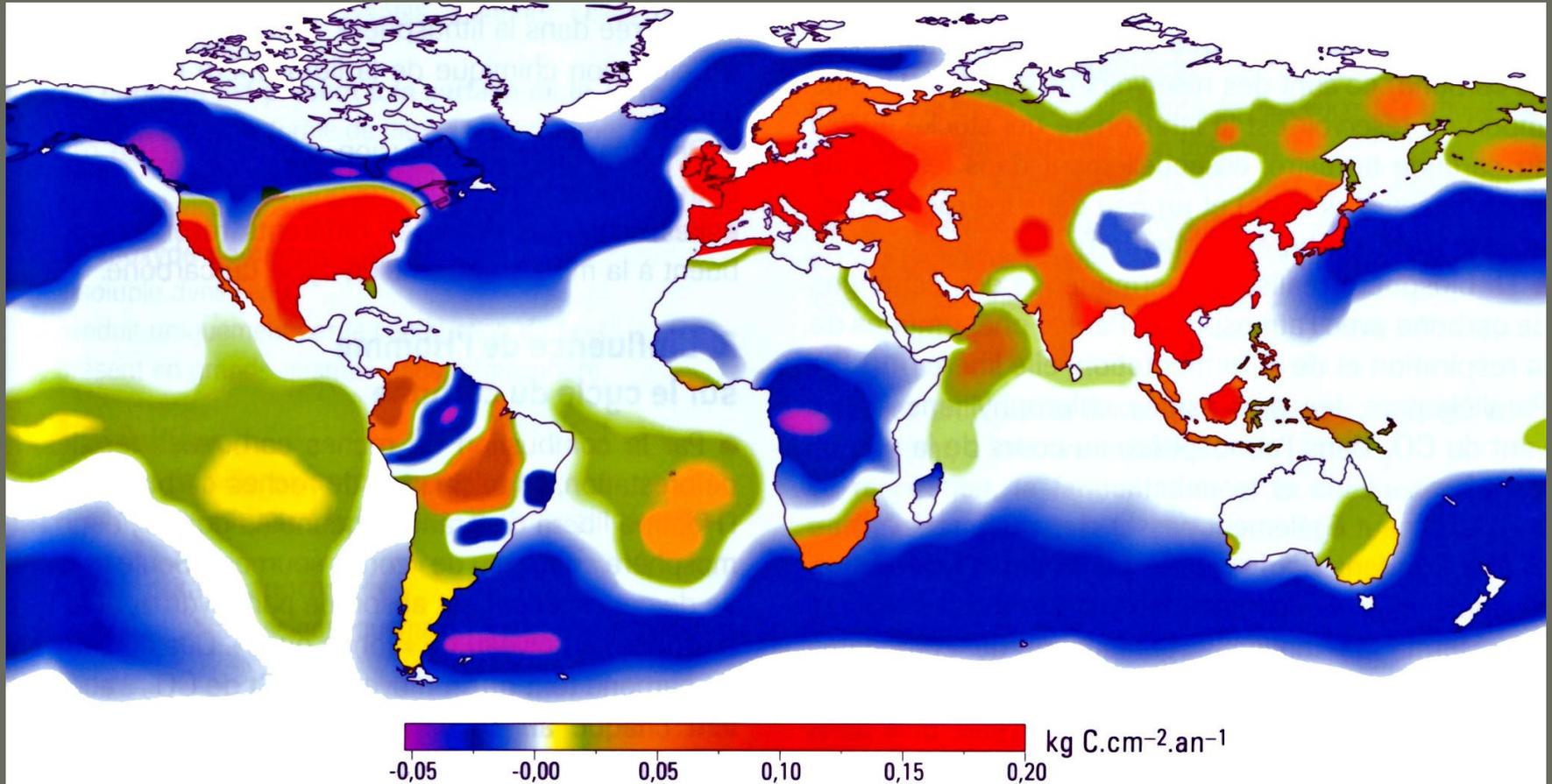
chlorofluorocarbones, gaz réfrigérants

# Activités humaines et cycle du carbone



# Flux moyens annuels de carbone à la surface de la Terre

Les activités humaines libèrent de grandes quantités de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ( plus de 6 Gt par an ) . L'excédent de CO<sub>2</sub> atmosphérique mesuré est ramené à 4 Gt environ par des mécanismes compensateurs naturels , des puits de carbone.

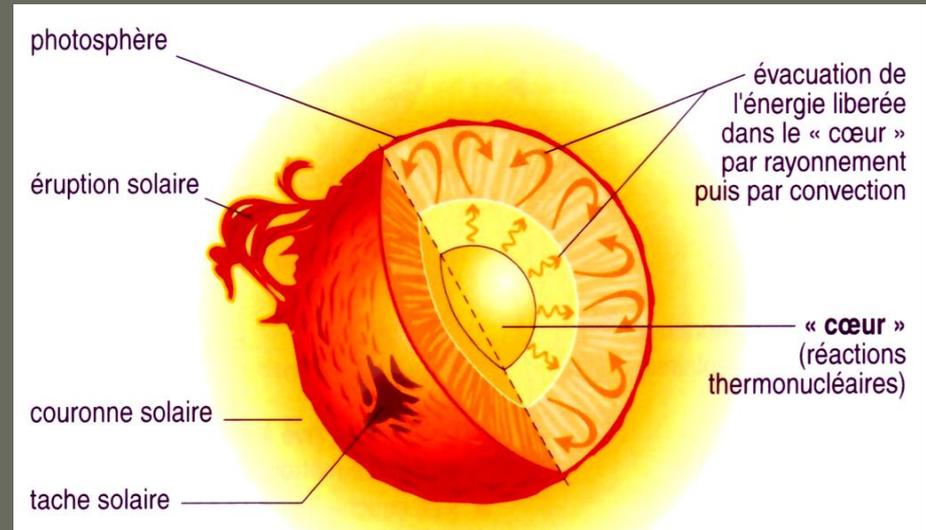
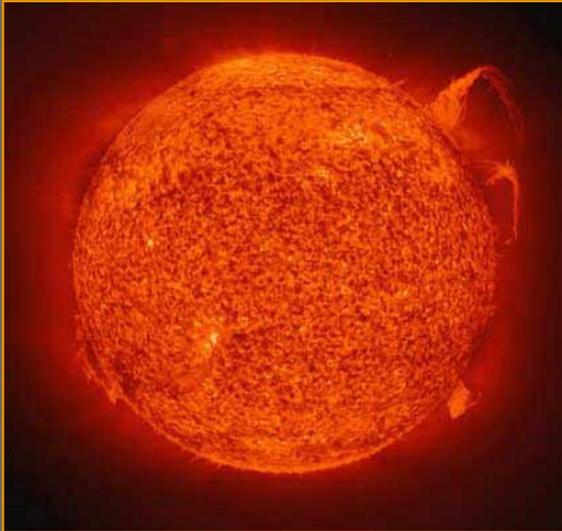


**Flux moyens annuels de carbone à la surface de la Terre montrant des « zones sources » (en rouge) et des « zones puits » (en bleu).**

# **IV . Les causes des variations climatiques**

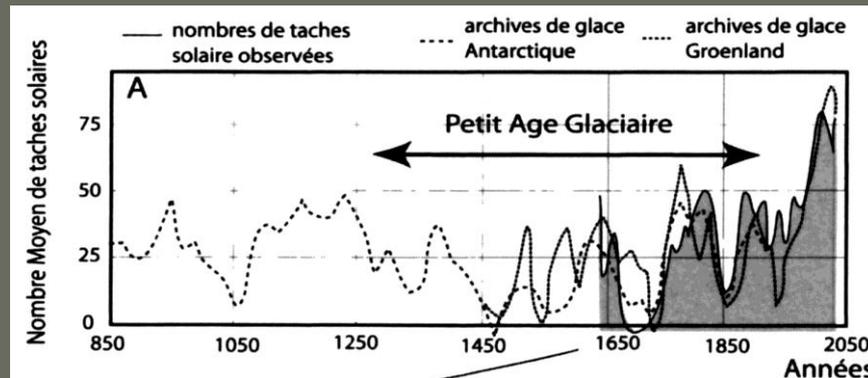
## **7. Autres causes**

# Variations de l'activité solaire



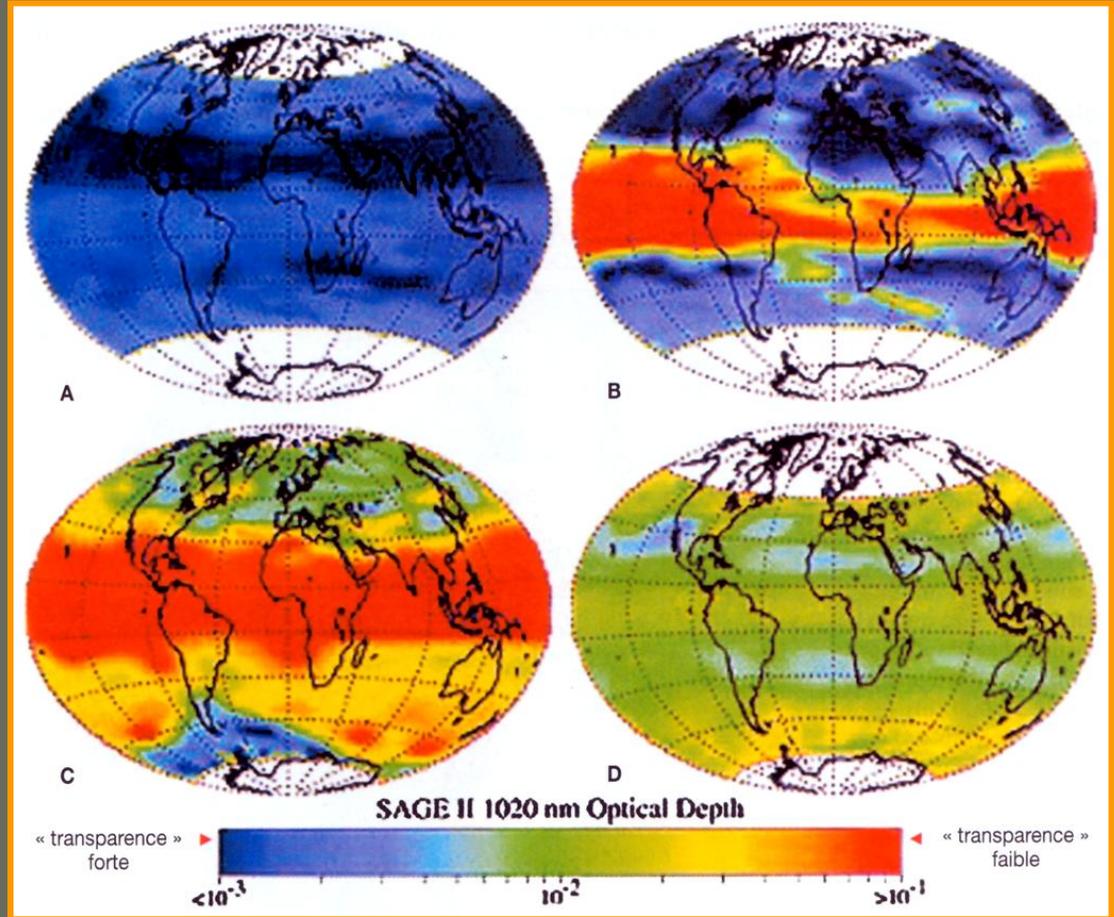
Le soleil présente une activité cyclique en relation avec le nombre de taches solaires (cycles de 11 , 27 , 78 et 181 ans ).

Pour certains chercheurs , les variations de l'activité solaire seraient responsables , par exemple , du « Petit âge glaciaire » et d'un tiers du réchauffement actuel.



# Effet parasol des aérosols

Éruption du Pinatubo , volcan philippin, en 1991

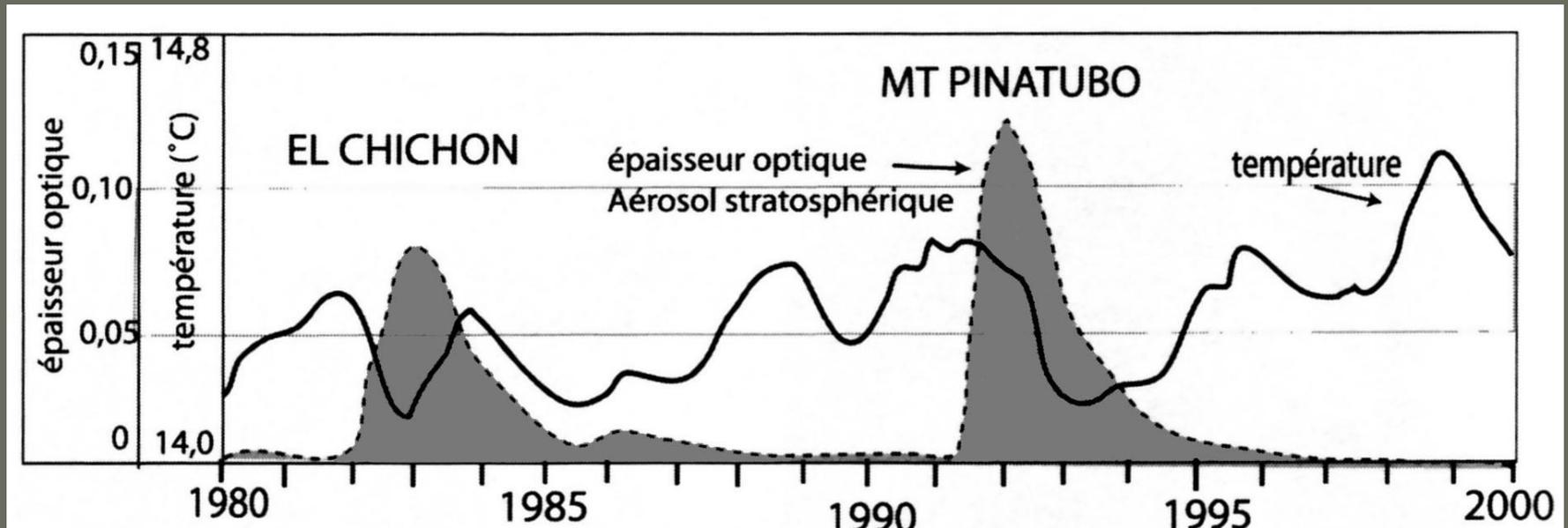


Mesure satellitaire de la transparence de l'atmosphère

A. Avant l'éruption – B. Pendant la phase éruptive C. Le mois suivant – D. 18 mois après

# Forçage climatique par les aérosols

Les aérosols comme les cendres volcaniques, les gouttelettes d'acide chlorhydrique et d'acide sulfurique des Volcans El Chichon et Pinatubo, ont un effet parasol s'opposant à l'effet de serre. En plus ils favorisent la nucléation des précipitations.



L'effet de forçage climatique par les aérosols est de même ordre que l'effet de serre estimé à  $2,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , mais en sens inverse.

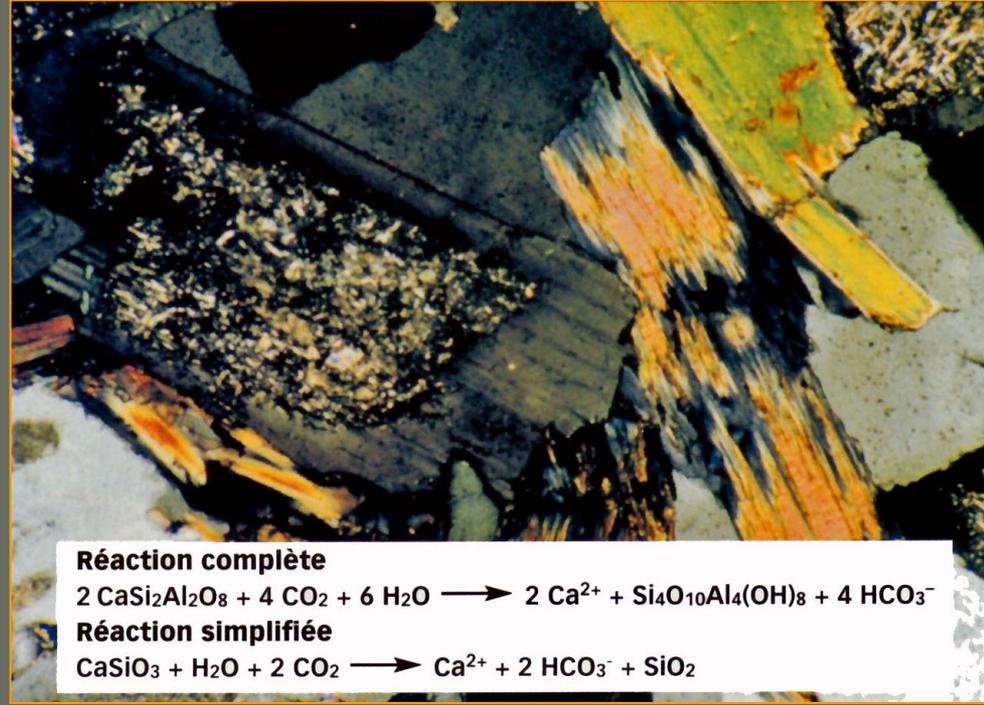
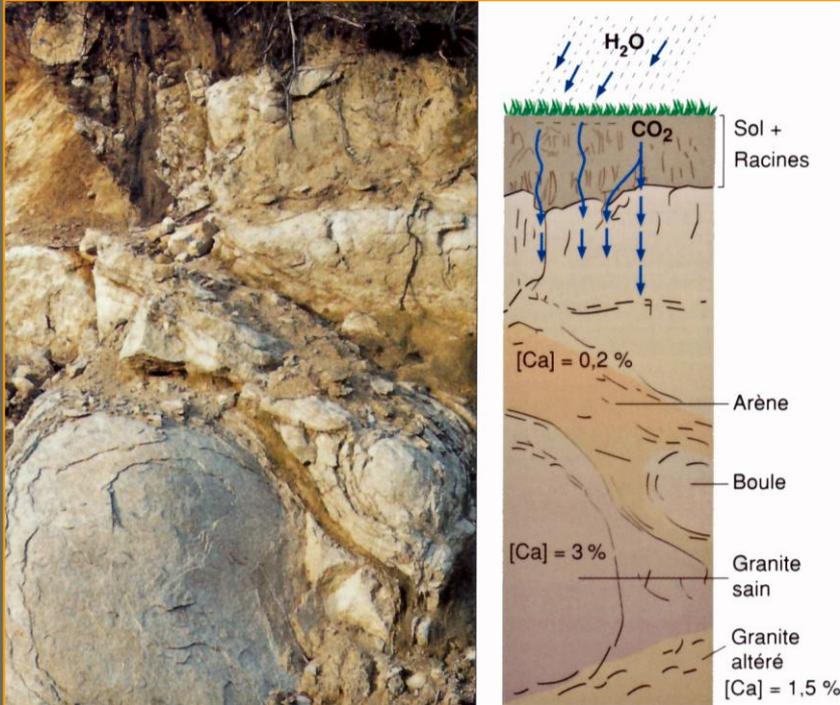
# Le rôle des nuages

Les nuages n'ont pas tous la même propriété optique.

Les nuages bas tels que les stratus renforcent l'albédo terrestre : leur surface blanche diffuse vers l'extérieur la lumière solaire. Ils s'opposent à l'effet de serre, on dit qu'ils ont un effet parasol.

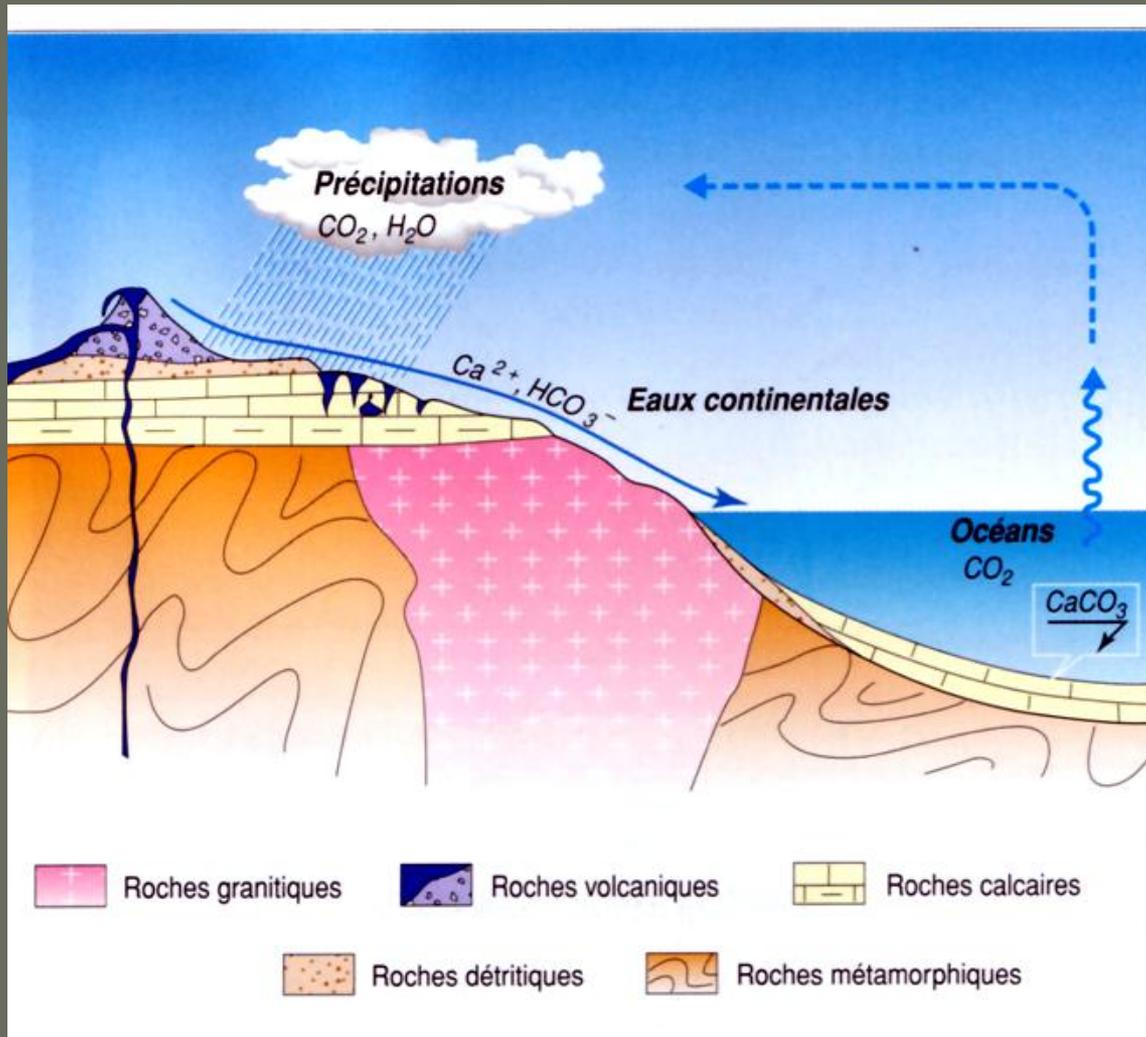
Les nuages de haute altitude tels que les cirrus réagissent aux rayons IR terrestres et participent à l'effet de serre

# L'altération des roches



L'altération du granite consomme du CO<sub>2</sub>

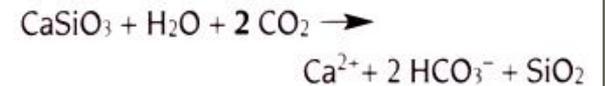
# Altération et sédimentation du Calcium



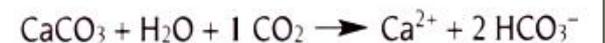
- Une molécule de CaCO<sub>3</sub> qui se dissout consomme 1 CO<sub>2</sub> et libère 1 Ca<sup>2+</sup>. Une molécule de CaCO<sub>3</sub> qui précipite en utilisant ce Ca<sup>2+</sup> libère 1 CO<sub>2</sub>. Le bilan global est nul.

- Une molécule de silicate calcique continental qui s'altère consomme 2 CO<sub>2</sub> et libère 1 Ca<sup>2+</sup>. Une molécule de CaCO<sub>3</sub> qui précipite en utilisant ce Ca<sup>2+</sup> libère 1 CO<sub>2</sub>. Le bilan est une consommation irréversible d'un CO<sub>2</sub>.

- La solubilisation du calcium des minéraux silicatés continentaux se fait suivant la réaction simplifiée :



La dissolution des calcaires continentaux se fait selon la réaction :



En mer, les calcaires précipitent selon la réaction :



# V . Les conséquences sur le niveau marin et les paléogéographies

## 1. Indices et mesures des variation du niveau marin

# La Grotte Cosquer ( près de Marseille )



## Niveau de l'entrée de la grotte :

actuel : - 37 m / mer ;  
à - 18 500 ans : + 112 m

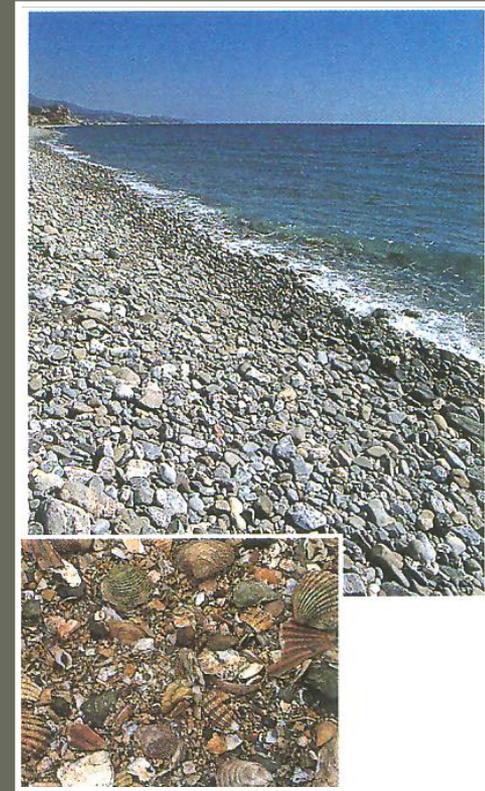
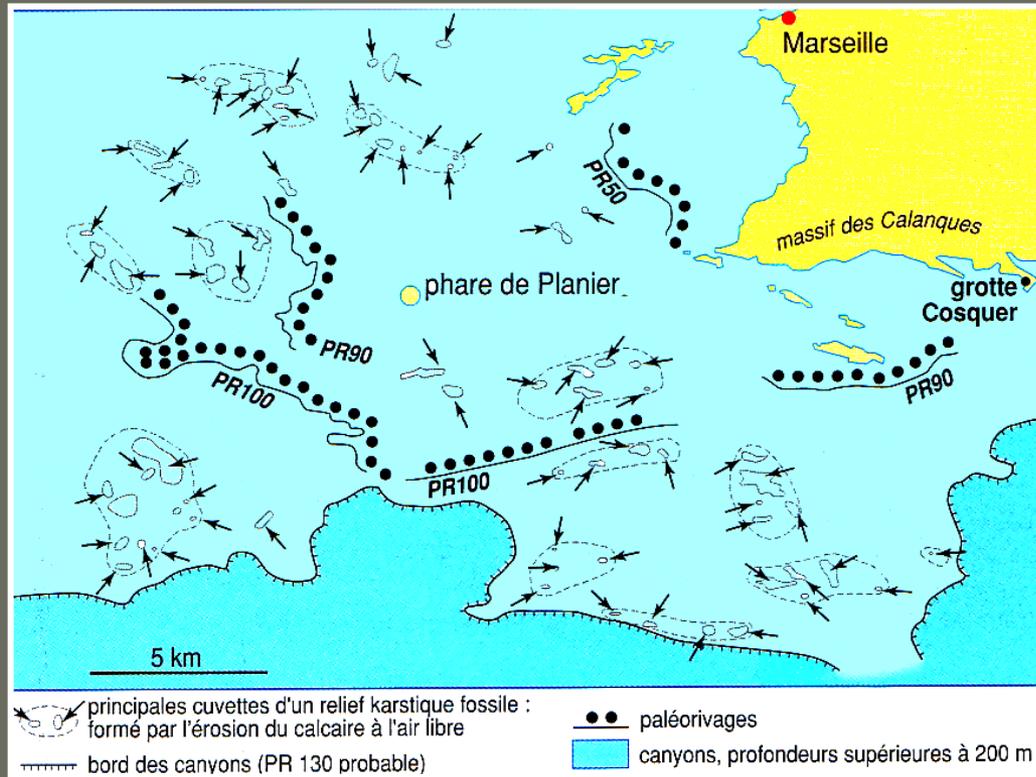
## Gravures et peintures

- 18 500 ans à - 28 000 ans

( Chevaux, phoques, Bouquetins, Chamois, pingouins, ... )



# Plusieurs lignes de paléorivages autour de la grotte Cosquer



**Sous la mer , on peut reconnaître , à l'aide de carottages , des dépôts caractéristiques d'anciennes plages :** des galets et des sables grossiers riches en débris de moules ; des sables fins avec des débris d'Oursins côtiers et de moules.

**Une datation au  $^{14}\text{C}$  , réalisée sur les coquilles fossiles , a permis de dater ces dépôts de paléorivages:**

PR50 : paléorivage de - 50 m ; - 8 500 ans

PR 90 : paléorivage de - 90 m ; - 11 700 ans

PR 100 : paléorivage de - 90 m ; - 13 850 ans

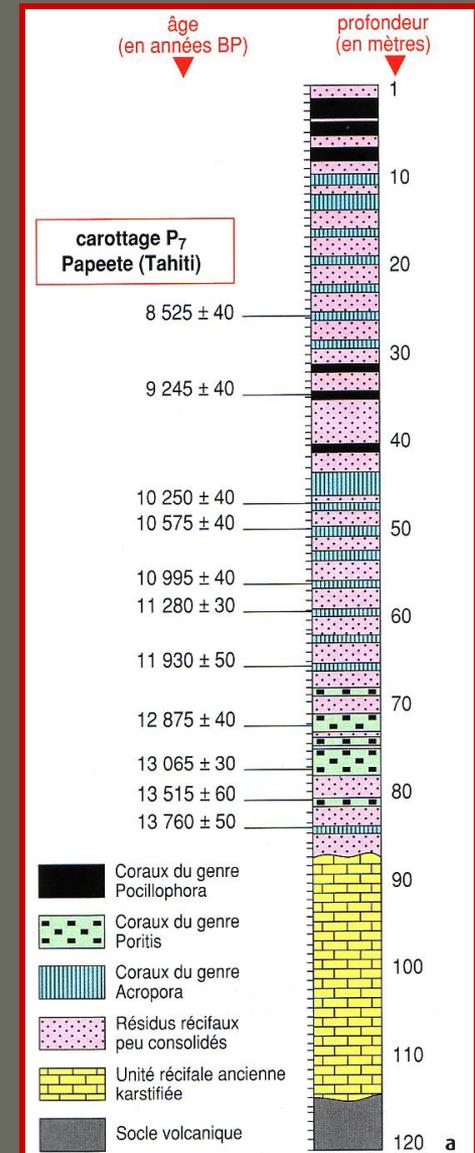
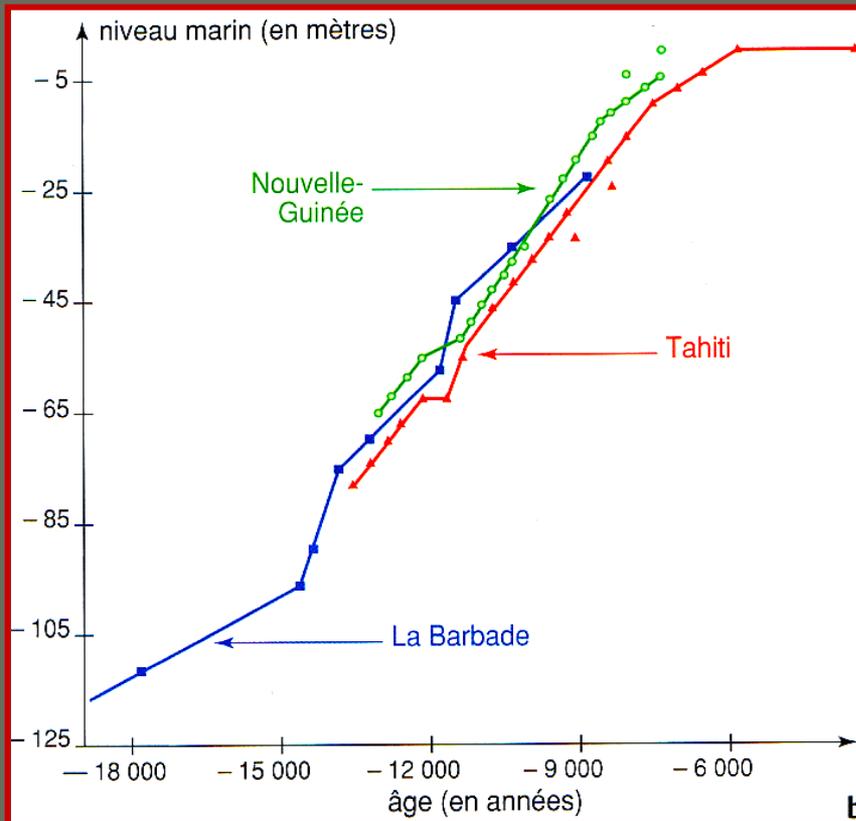
**Le bord des canyons situés à - 130 m pourrait constituer un autre paléorivage daté d'environ - 20 000 ans**

# Les informations apportées par les coraux fossiles

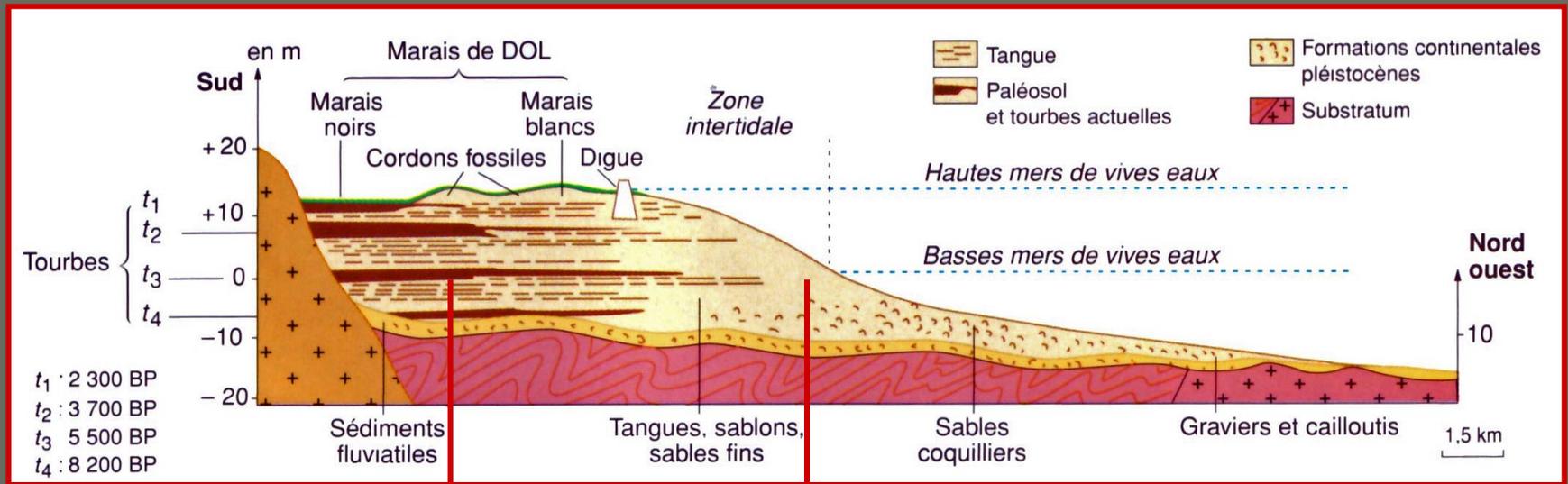


## Des conditions de vie strictes

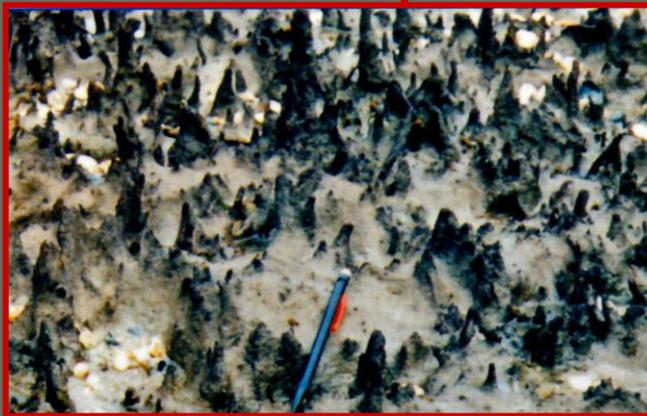
Mers chaudes (  $T^{\circ}\text{C} > 18^{\circ}\text{C}$  ) ;Eaux limpides, bien oxygénées;Profondeur faible (< 5 m pour certains coraux, genre *Acropora* ) pour un bon éclairciment des algues réalisant la photosynthèse.



# Les formations sédimentaires récentes de la baie du Mont St Michel



## Coupe schématique



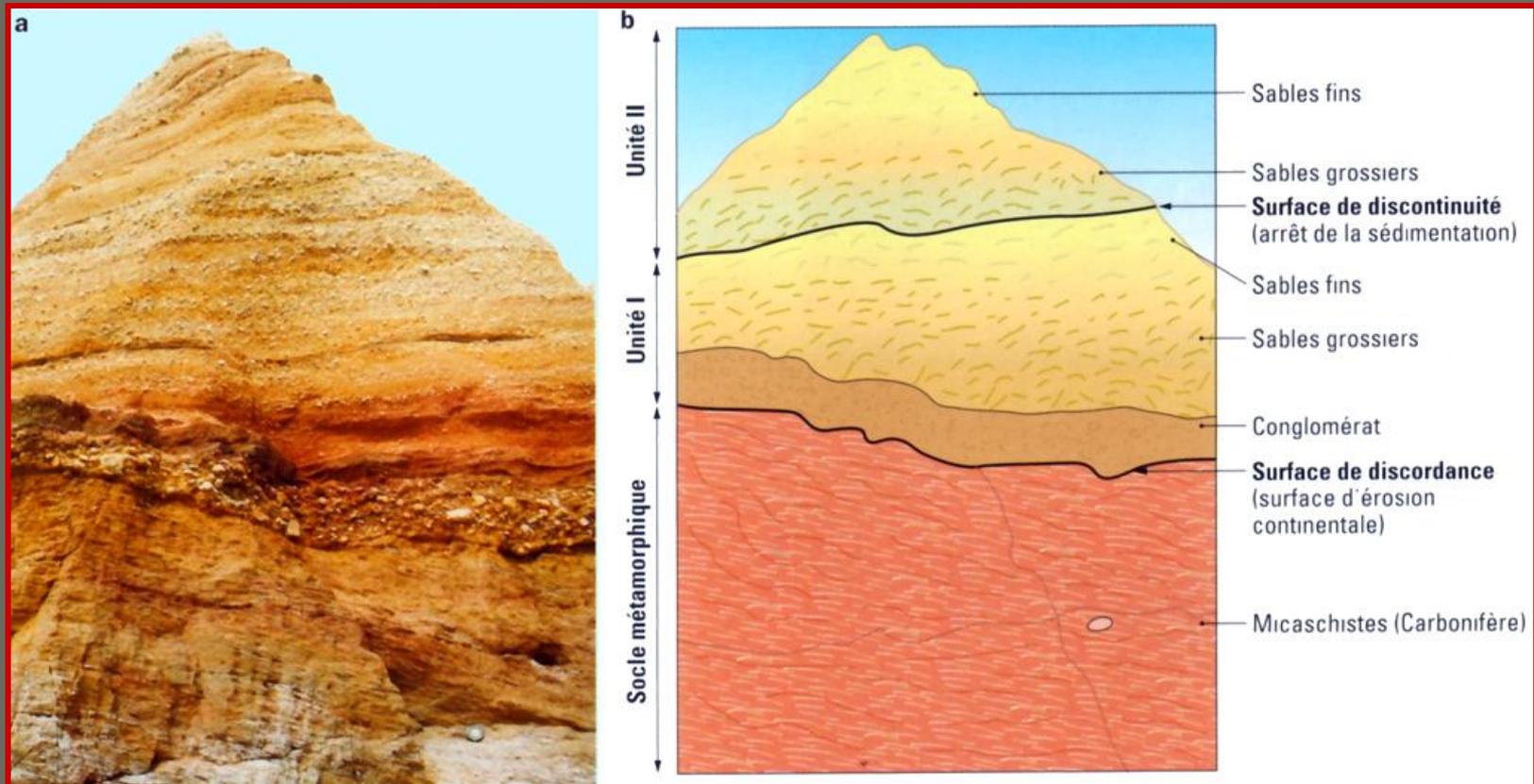
Restes de végétaux dans des formations tourbeuses au sein de la tange



Terrains de l'ancienne tange abandonnée par la mer, il y a 3 000 ans.

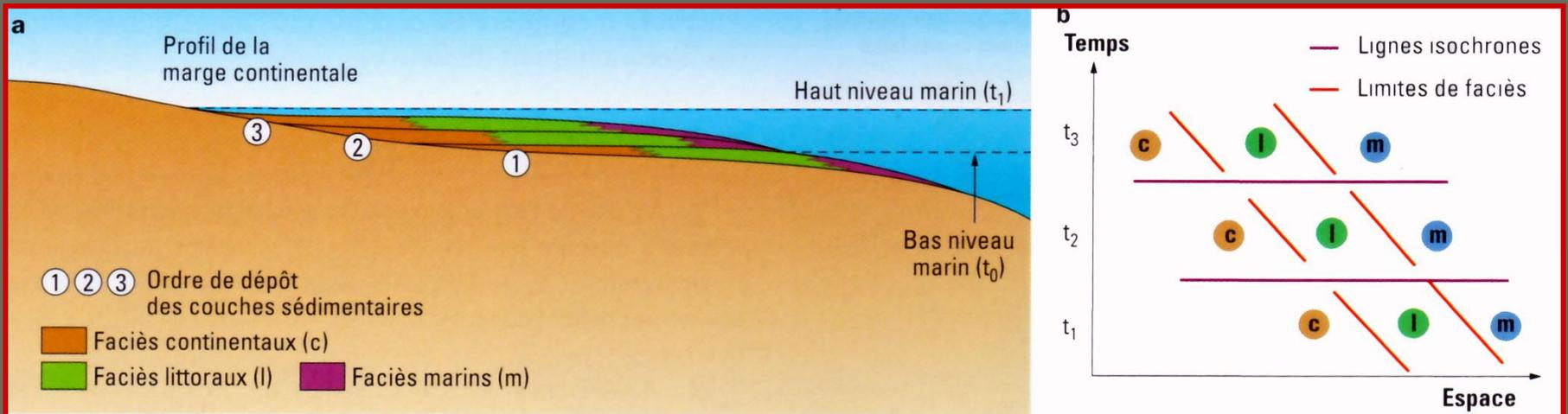
# Séquences sédimentaires et variations eustatiques

Formation sédimentaire de la plage de la Mine d'or à Pénestin ( 44)



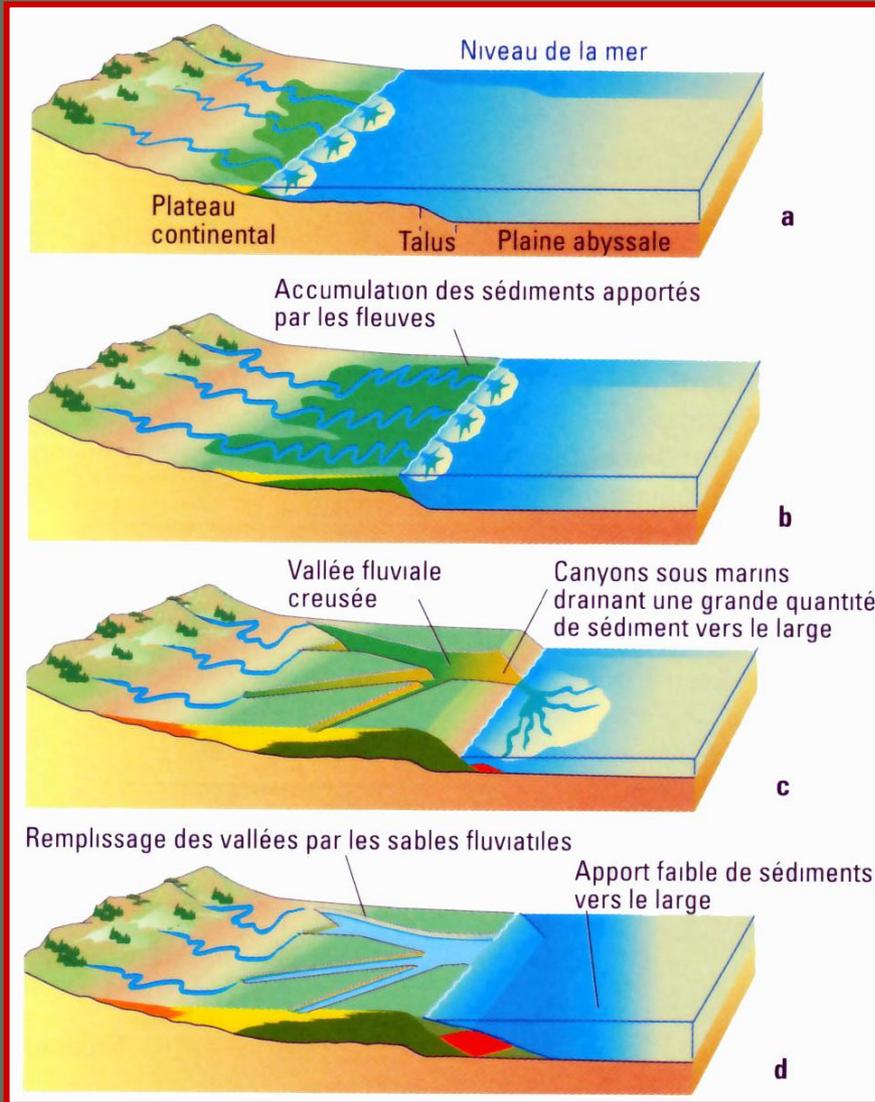
2 séquences sédimentaires de sables granoclassés témoignant de 2 transgressions marines du Quaternaire ( 1 800 000 à 10 000 BP)

# Formation d'une série sédimentaire transgressive



**Formation d'une séquence sédimentaire rétrogradant sur la marge, c'est-à-dire s'avancant sur le continent (a) ; mise en relation des paramètres espace-temps (b) :** la position des faciès dans une séquence sédimentaire verticale permet de reconstituer leur disposition horizontale au cours du temps. Les faciès sont définis à partir de la nature et du contenu paléontologique des roches, traduisant leurs conditions de dépôt (exemple : faciès continental, littoral ou marin).

# Évolution du niveau eustatique et de la topographie du littoral

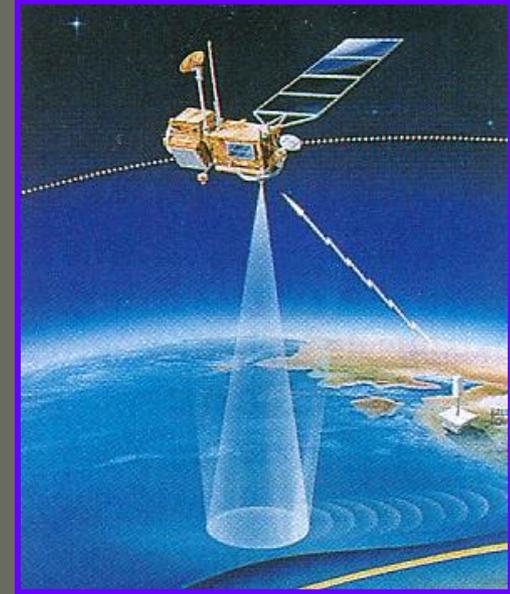


**Lorsque le niveau de la mer baisse**, le profil d'équilibre des fleuves baisse, la pente augmente, les fleuves creusent leur lit et s'encaissent.

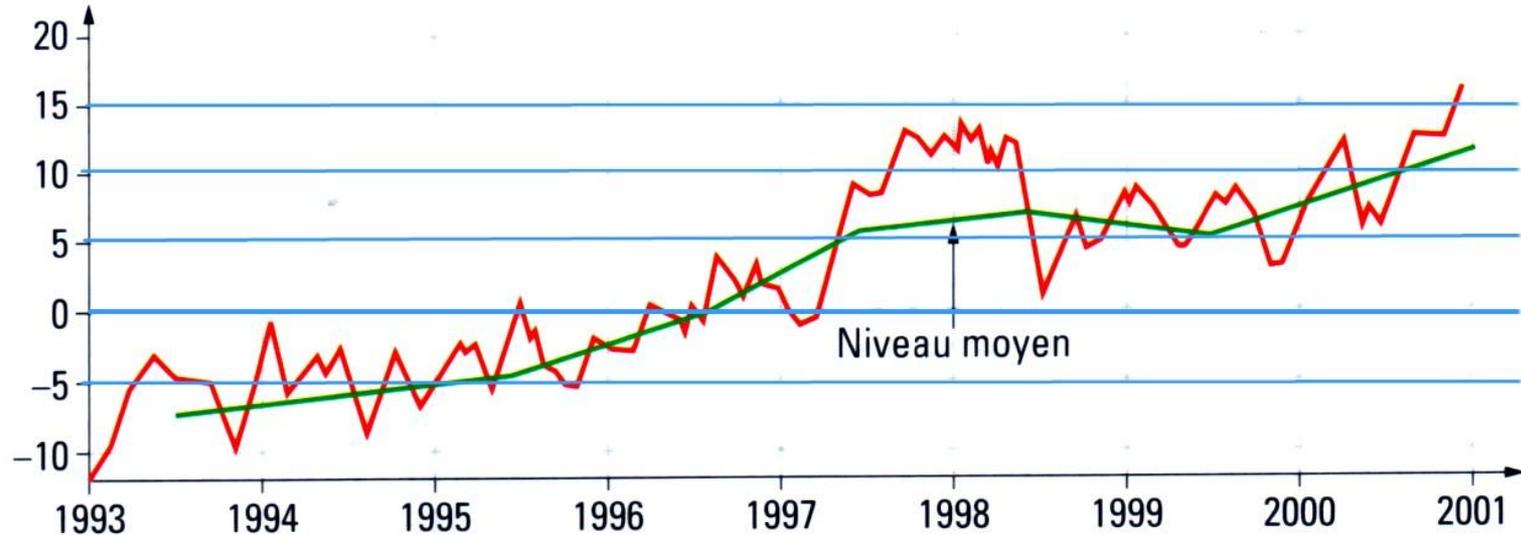
La plate-forme continentale est en partie émergée. La sédimentation a lieu plus loin, au pied du talus continental où les taux de sédimentation y sont plus élevés.

**Lorsque le niveau marin remonte**, le profil d'équilibre des fleuves remonte, favorisant les dépôts sédimentaires dans le lit des fleuves, les estuaires et sur la plate-forme continentale qui sont envoyés par les sédiments.

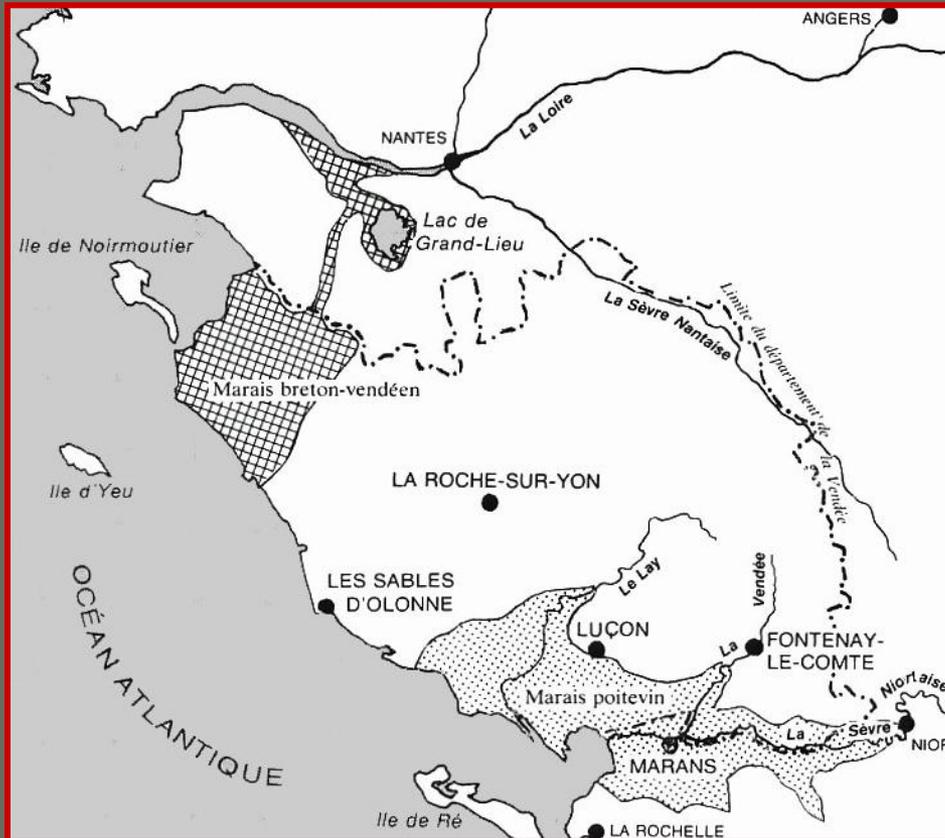
# Mesures du niveau marin avec le satellite Topex-Poséidon



Variation du niveau marin (mm)



# Les variations du niveau marin et la genèse des marais vendéens

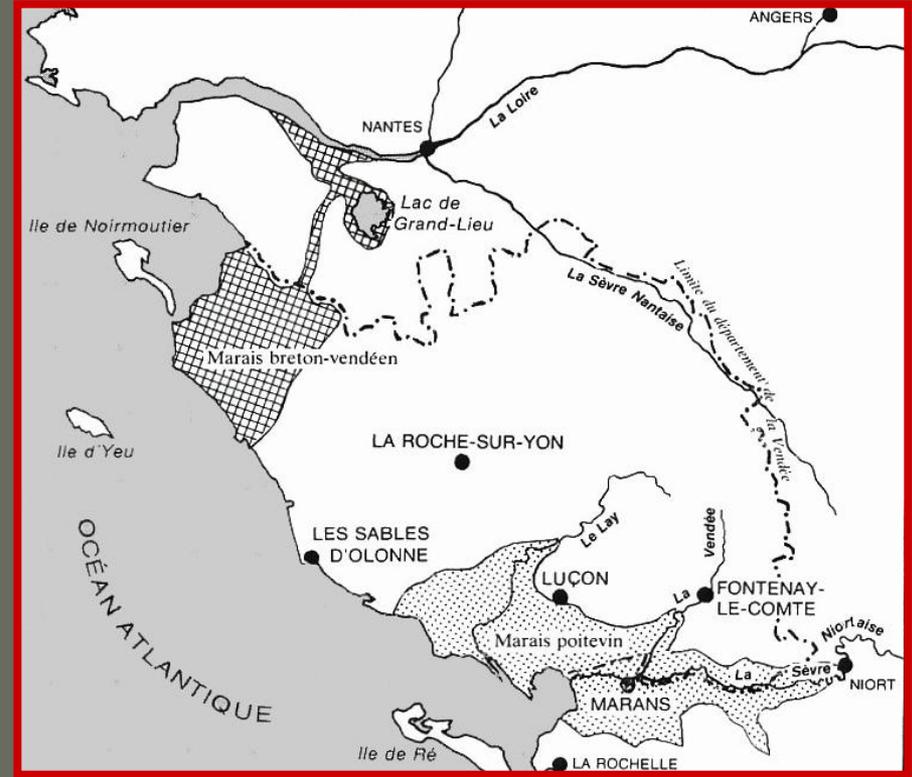
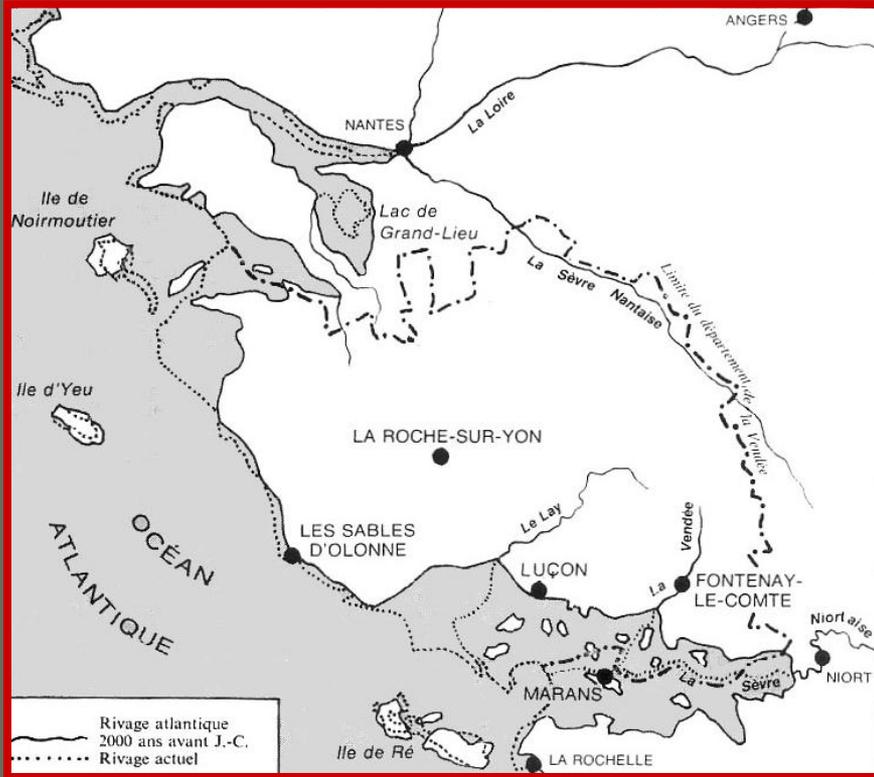


Dans une zone déprimée à cause de la structure (synclinal de Bourgneuf), ou de la lithologie (marnes jurassiques pour le Marais poitevin), la mer s'avance lors de la **transgression éémienne (ou normannienne)**, c'est-à-dire pendant l'interglaciaire Riss-Würm **vers 100 000 BP**. Les sables, cailloutis et limons, alors apportés par les rivières et répartis par la mer forment aujourd'hui des " moyennes terrasses ".

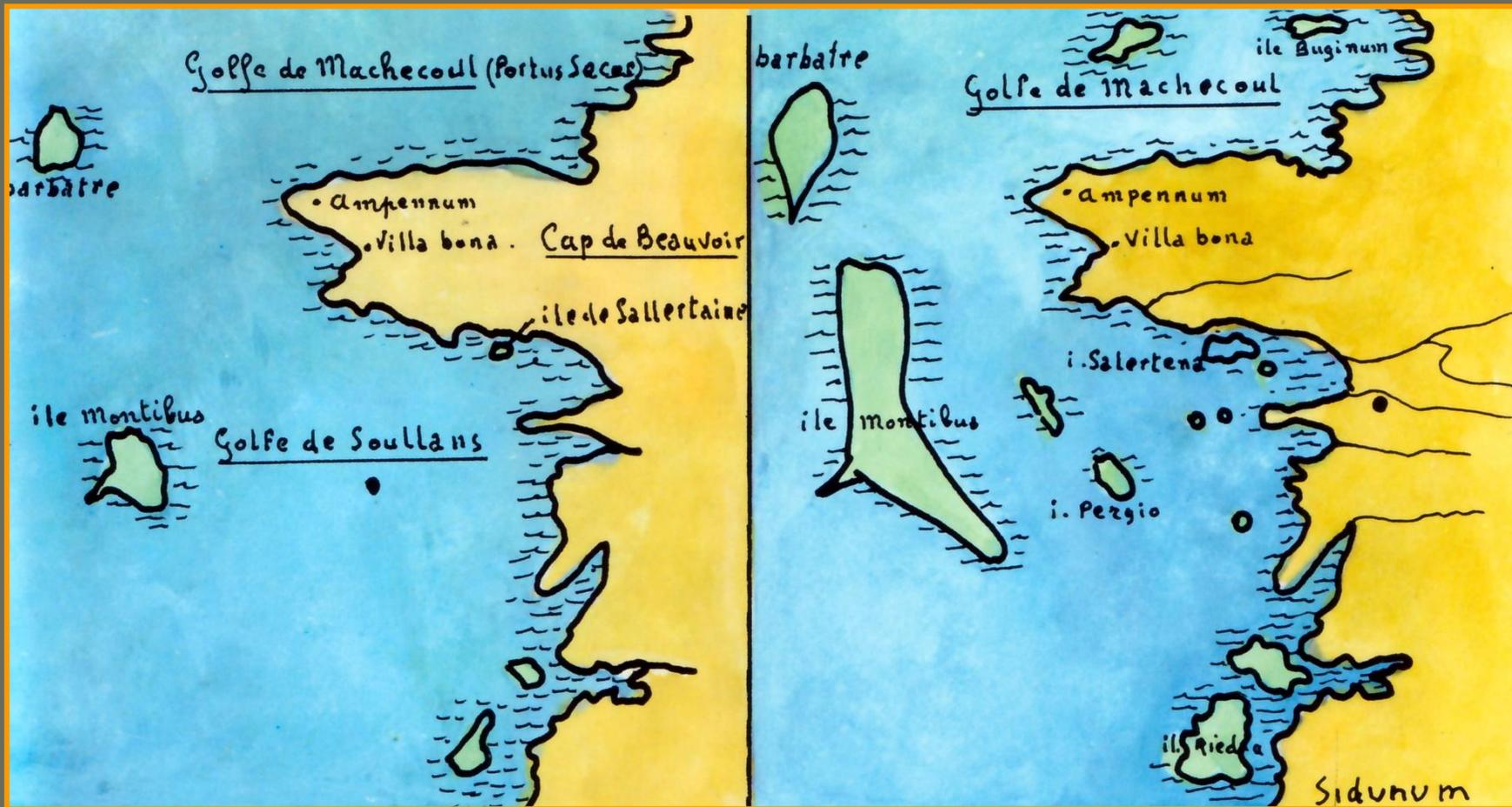
Au cours de la **dernière glaciation (Würm, de 80 000 à 10 000 BP)**, où **le niveau de la mer s'abaisse** jusqu'à - 120 m, se réalisent un creusement intense du lit des rivières et un déblaiement des dépôts de l'interglaciaire Riss-Würm qui, démantelés, subsistent à l'état de vestiges (terrasses ).

Après la fusion des calottes glaciaires du Würm, achevée **vers 8 000 BP**, la remontée du niveau marin lors de la **transgression flandrienne** conduit à l'inondation des golfes puis à leur colmatage progressif par **le bri** , vase argilo-sableuse très fine à *Scrobiculaires*, *Cardium edule*, *Bittium reticulatum* ,

# Paléorivage de la Vendée à 4000 ans BP



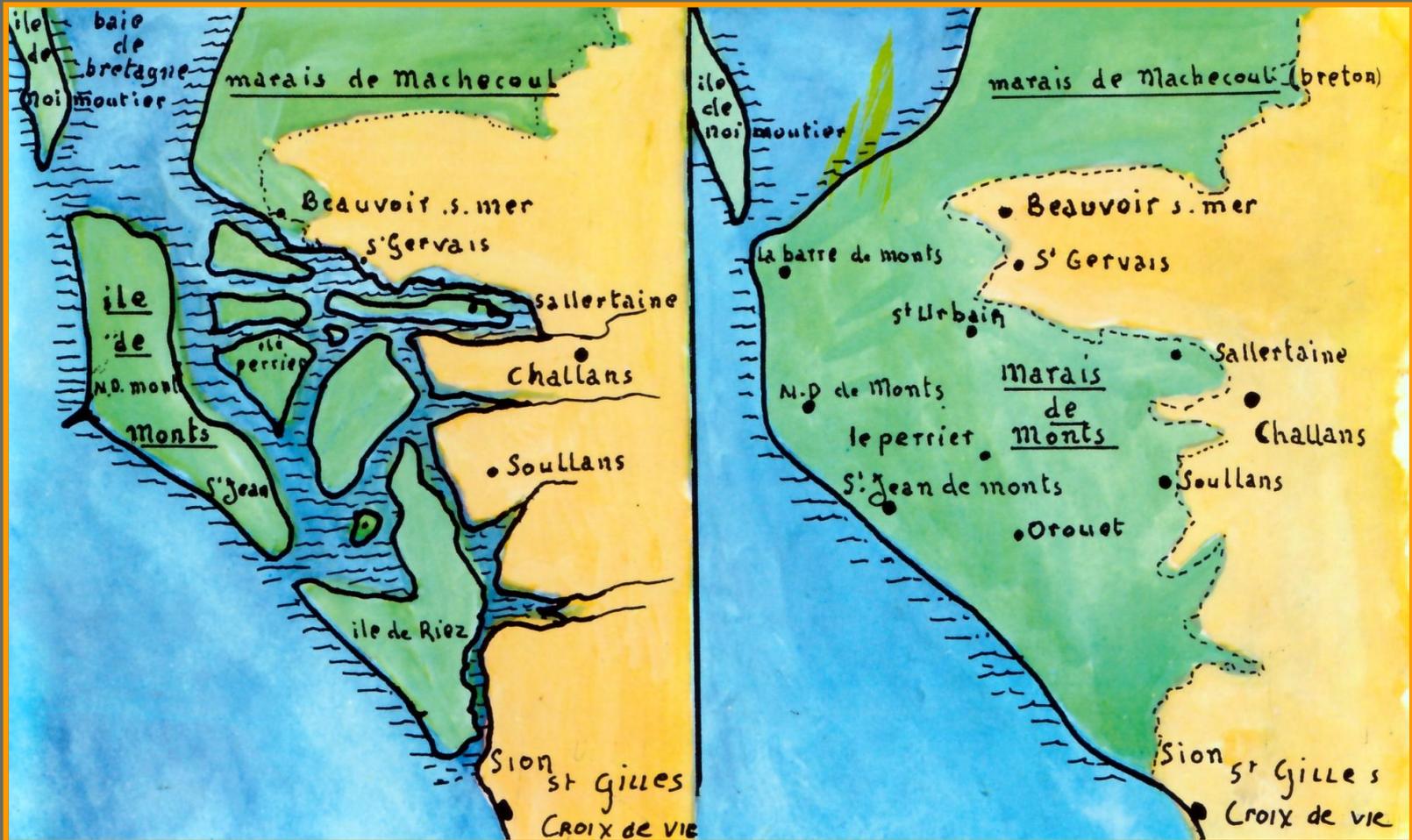
# Du Golfe de Soullans à la Côte de Monts ( 1 )



3 000 ans BP

2 000 ans BP

## Du Golfe de Soullans à la Côte de Monts ( 2 )



Haut Moyen âge

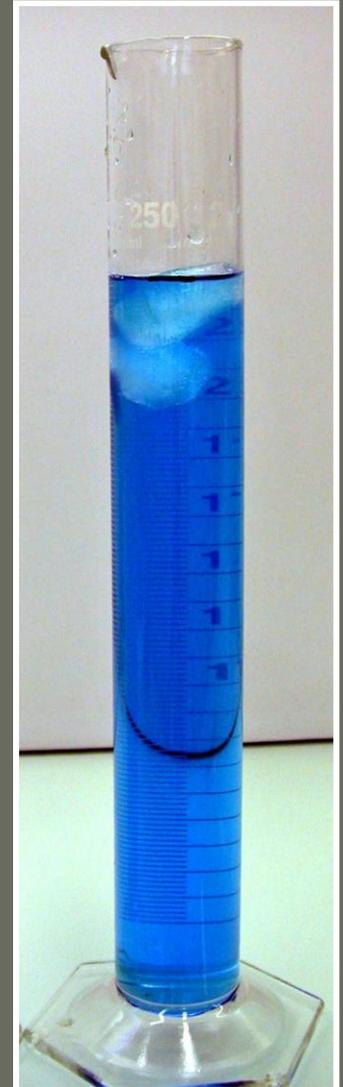
Aujourd'hui

# **V . Les conséquences sur le niveau marin et les paléogéographies**

2. Les relations entre les variations climatiques et eustatiques

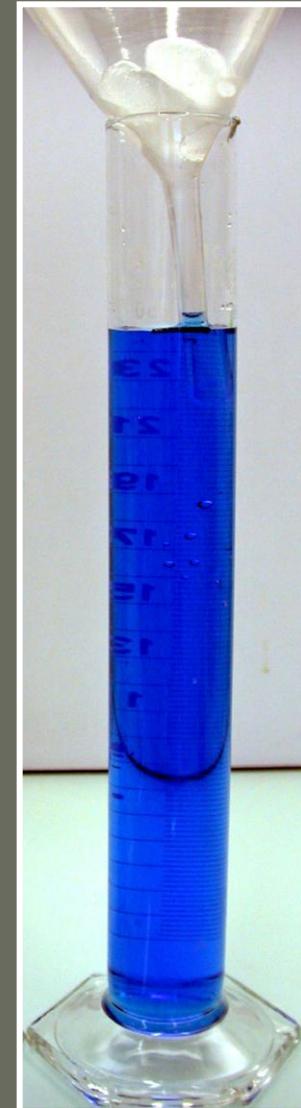
# Relation entre déglaciation et variation du niveau marin

modèle analogique n°1



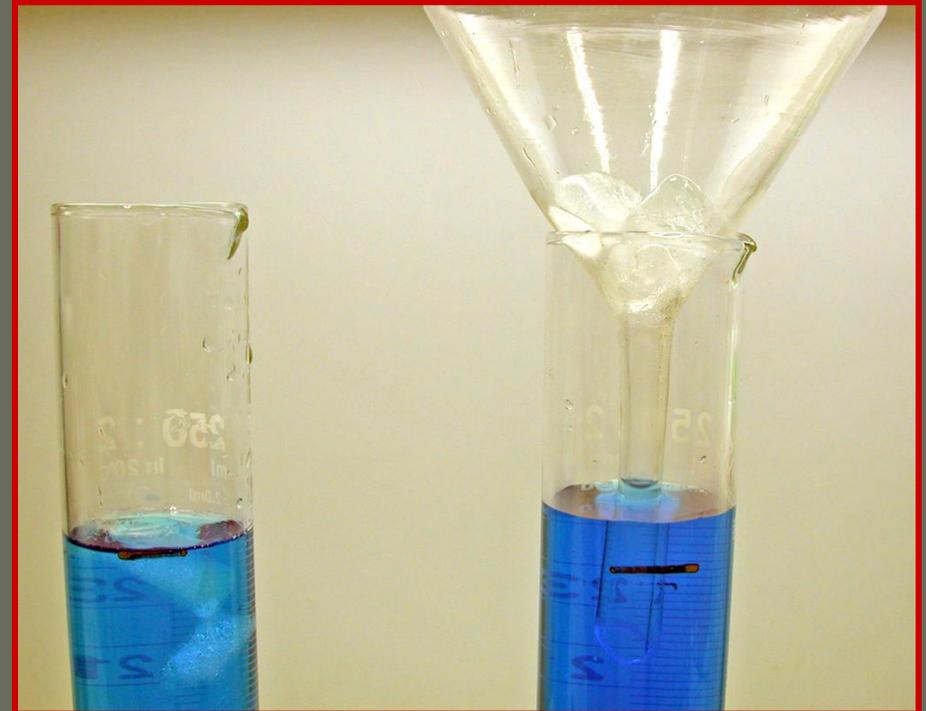
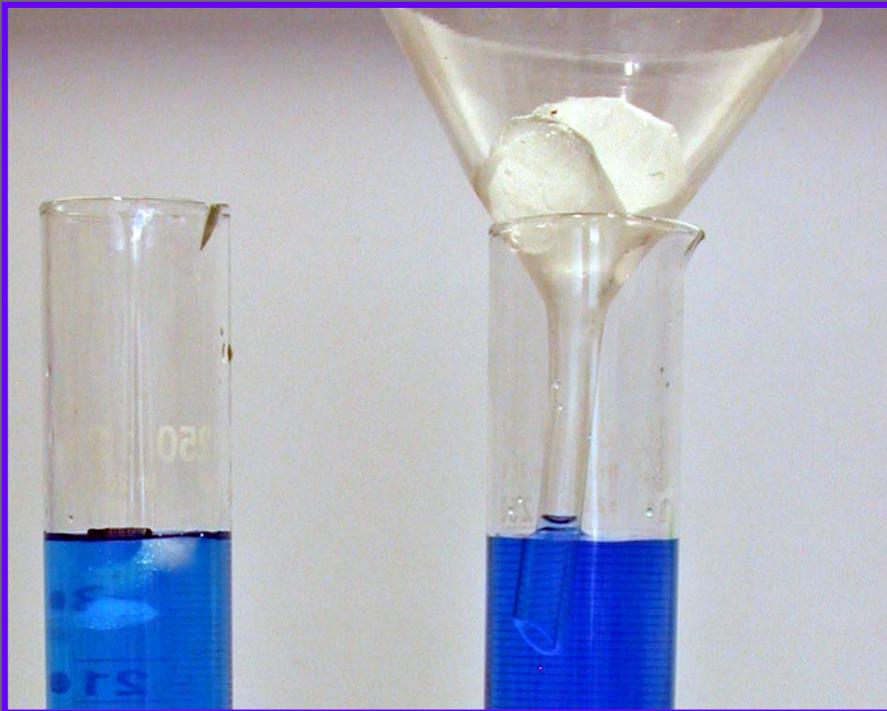
# Relation entre déglaciation et variation du niveau marin

modèle analogique n°2

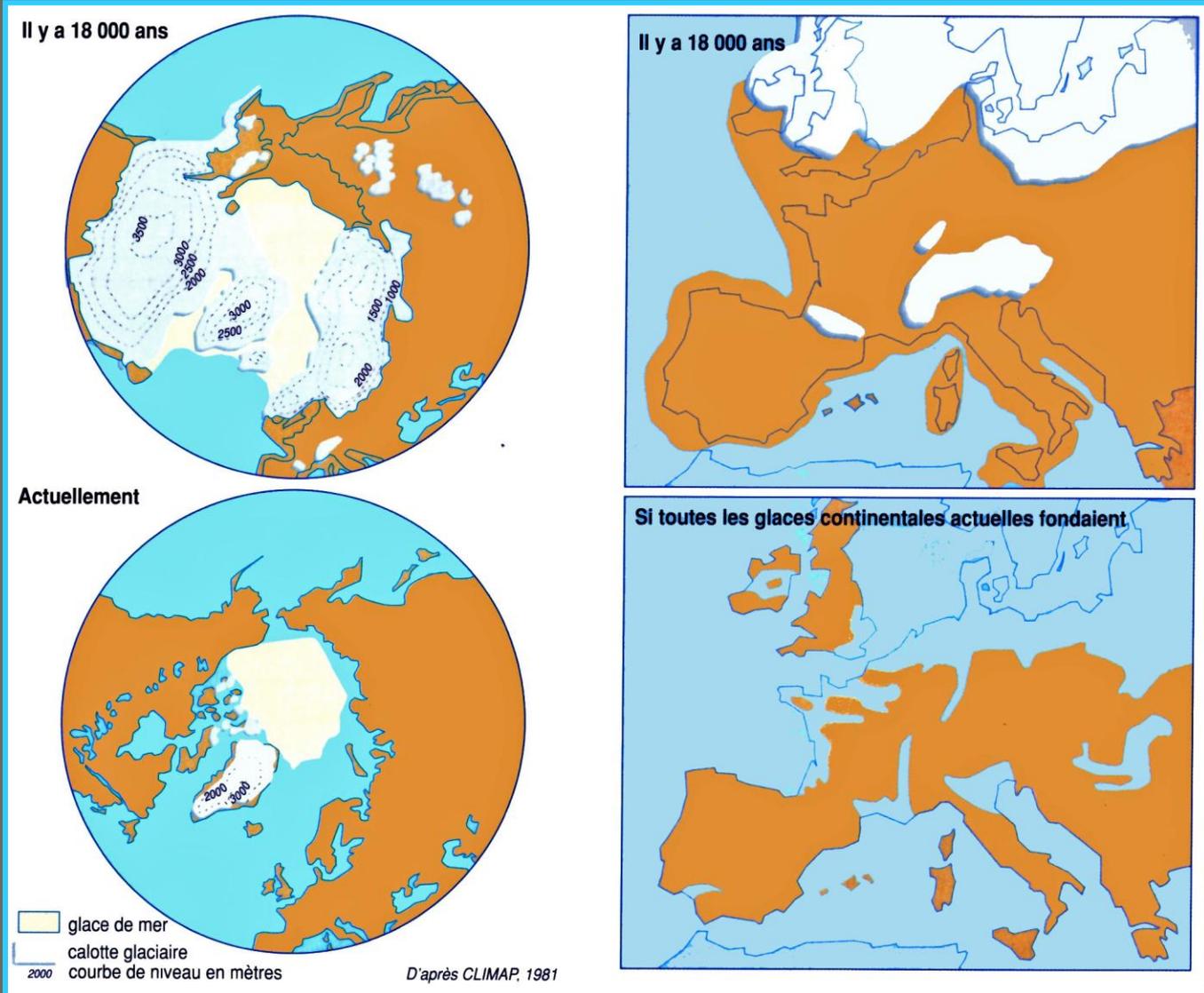


# Relation entre déglaciation et variation du niveau marin

## Les résultats expérimentaux

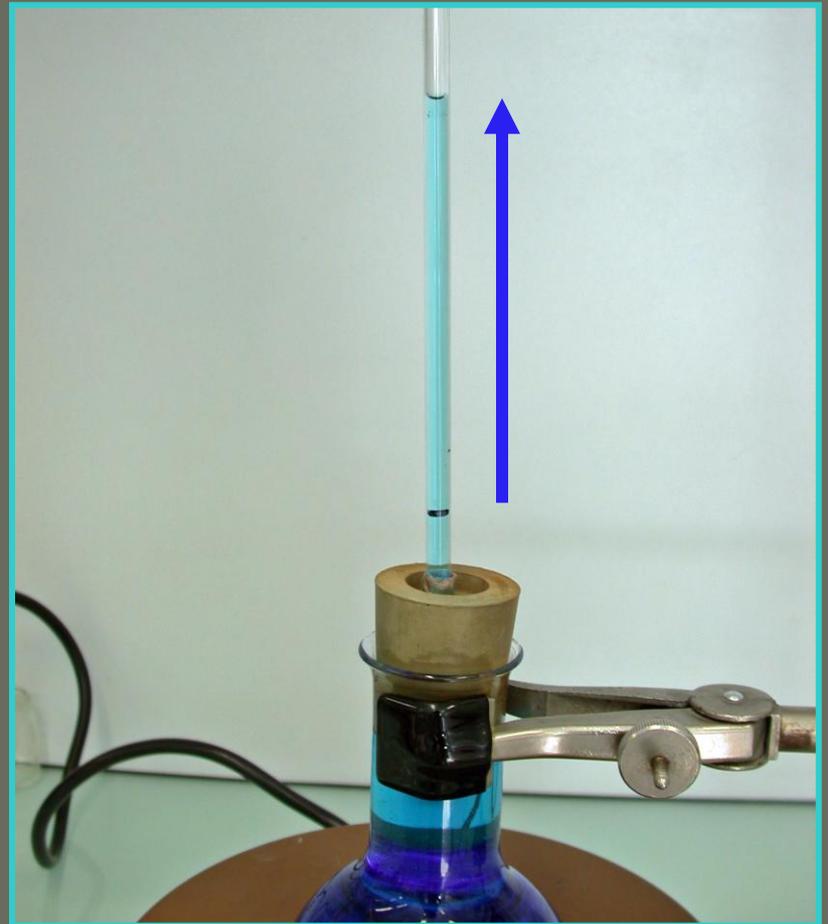


# Une relation étroite entre le volume des glaces continentales et le niveau de la mer

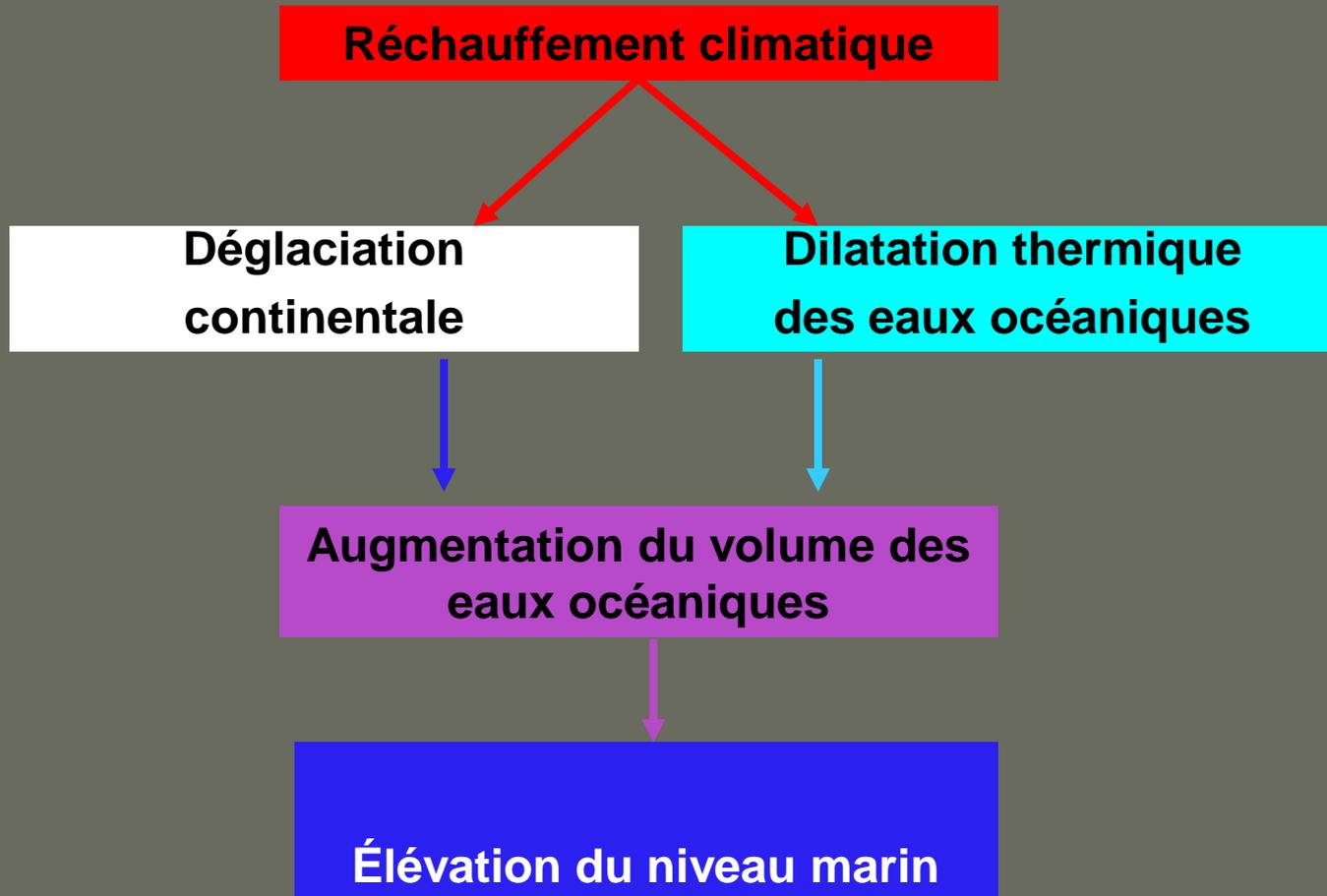


# La dilatation thermique de l'eau

Un modèle analogique



# Réchauffement climatique et élévation du niveau marin au Quaternaire

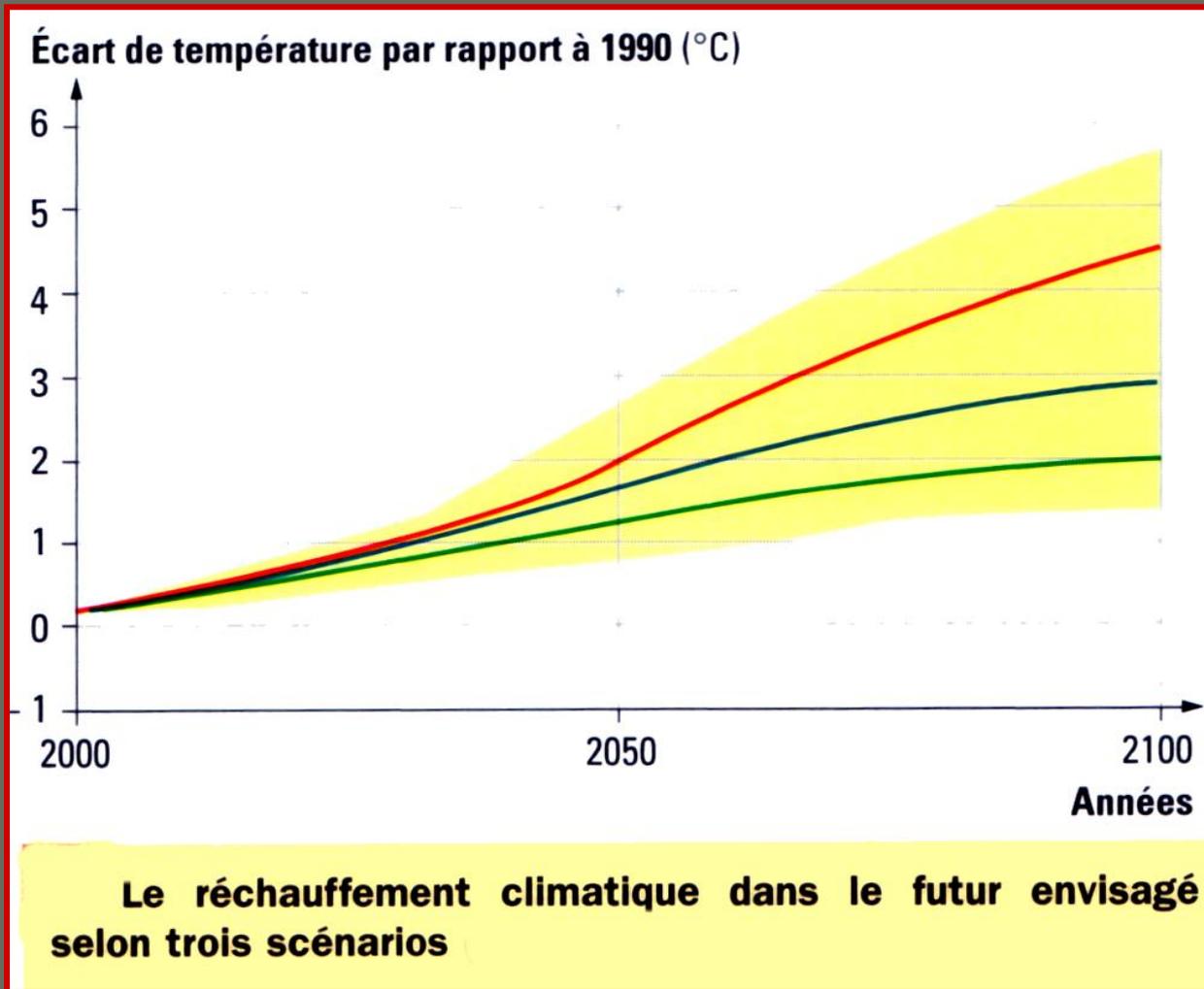


**Autre facteur important à l'échelle des temps géologiques :**

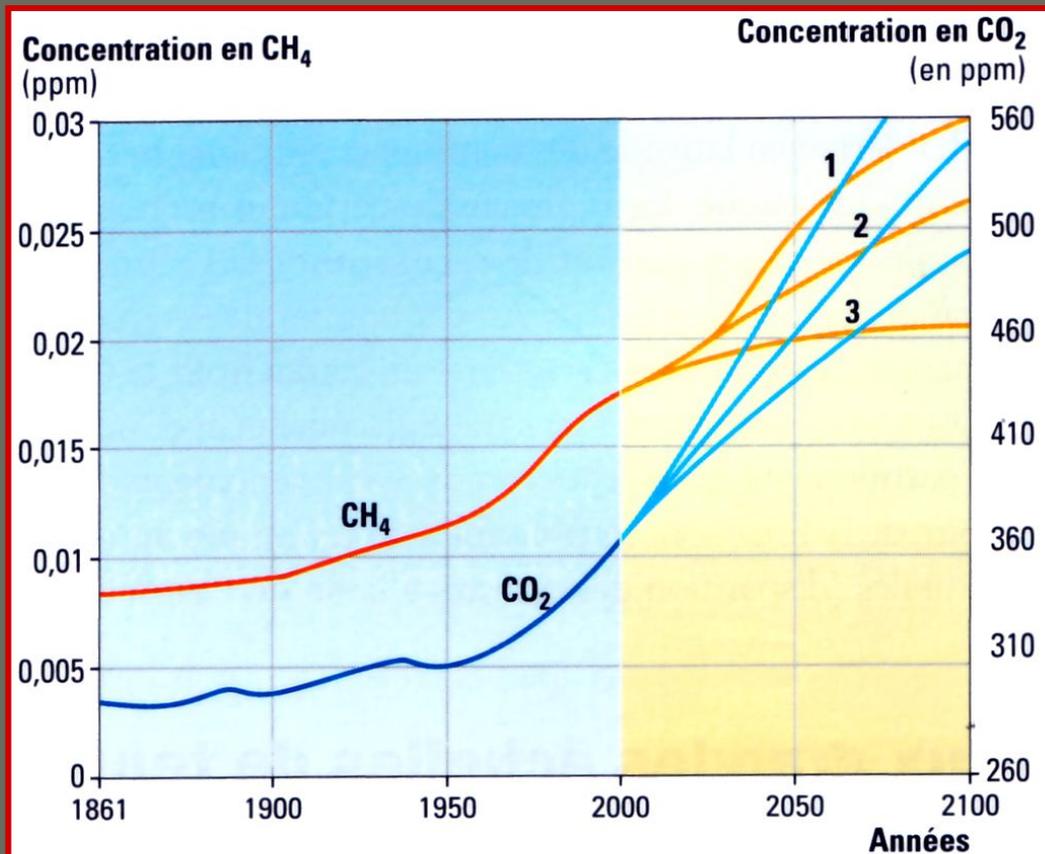
**L'activité des dorsales océaniques qui influe sur le volume des bassins océaniques**

**Et après demain ?**

# Modèles de prévision climatique



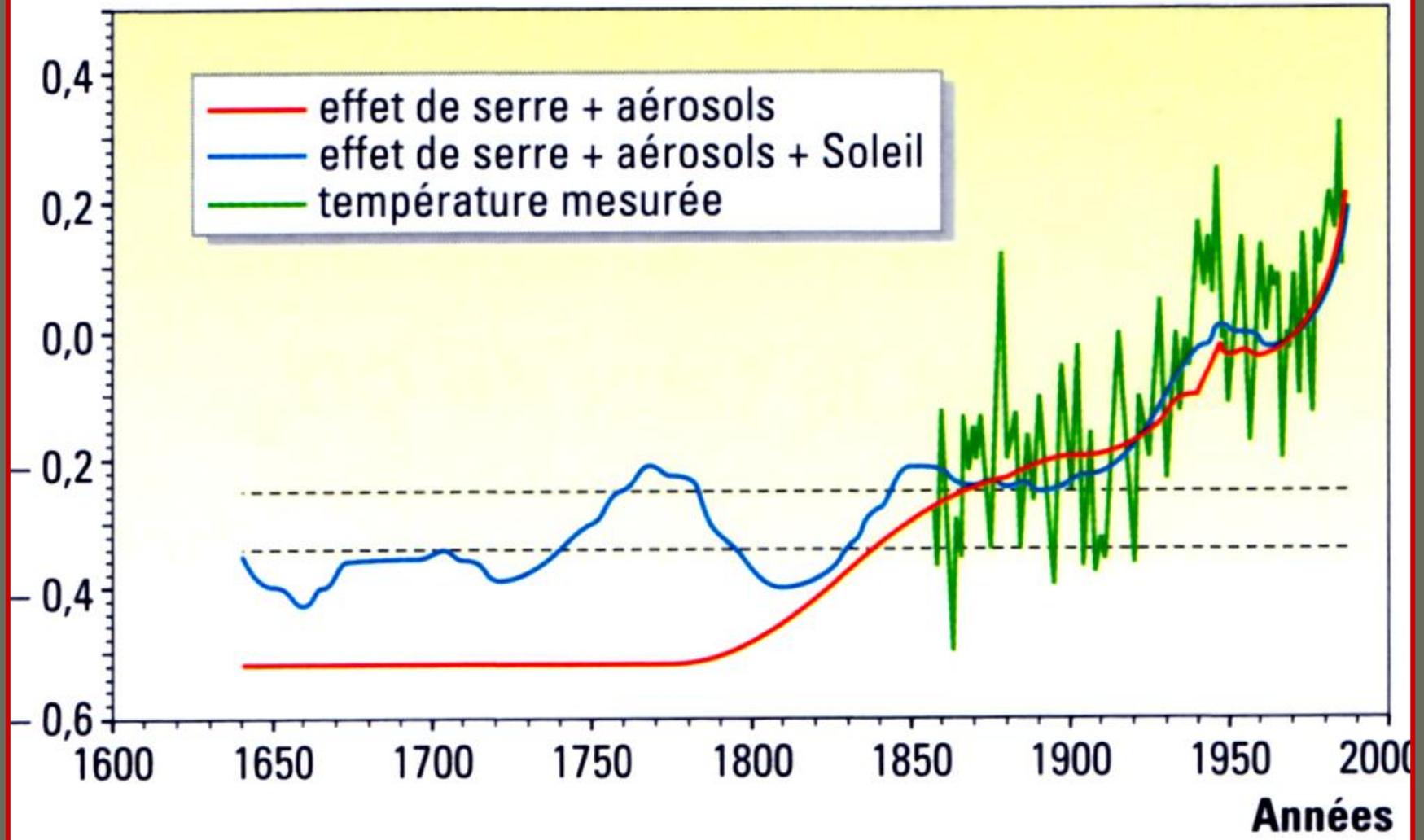
# Modèles de prévision climatique



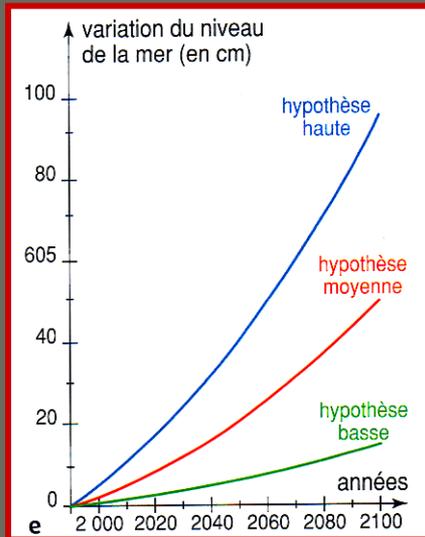
**Évolution du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub> atmosphérique selon 3 scénarios :** **1.** effet de serre amplifié par la vapeur d'eau (rétroaction positive); **2.** effet de serre minoré par la nébulosité (rétroaction négative); **3.** rétroaction négative (scénario 2) amplifiée par l'action des fluctuations solaires à courtes périodes.

# Modèles de prévision climatique

## Variation de la température (°C)



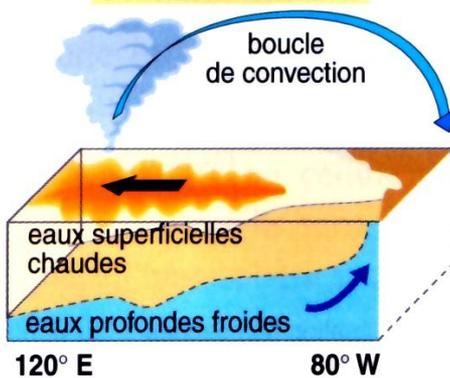
# Demain , les pieds dans l'eau ?



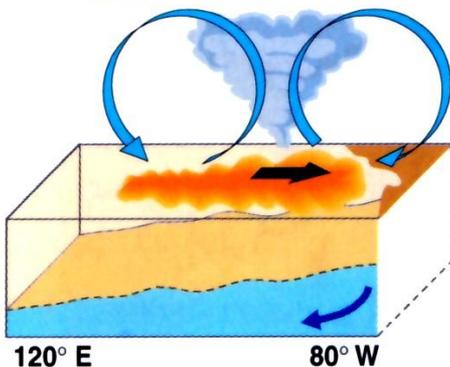
Affaire à suivre !

# El Niño

## Conditions normales



## Conditions «El Niño»



Les pêcheurs de la côte ouest de l'Amérique du Sud décrivent depuis longtemps l'apparition cyclique, tous les trois ou quatre ans, d'un courant marin qui réchauffe les eaux littorales du Chili et du Pérou. Ce phénomène a été baptisé El Niño (« l'enfant Jésus ») car il se manifeste aux environs de Noël.

Les eaux froides (18 à 20 °C), riches en plancton, sont alors remplacées par des eaux à 26 °C. Cet échauffement provoque localement la disparition des bancs d'anchois et bouleverse l'économie basée sur la pêche. Par ailleurs, le climat de nombreuses régions du globe est perturbé : des pluies diluviennes s'abattent sur des zones arides et la sécheresse touche des régions normalement humides (Asie du Sud-Est).

On connaît maintenant l'origine de ce dérèglement. Les alizés qui habituellement rabattent les eaux chaudes vers la bordure ouest du Pacifique, sont moins actifs ; il en résulte un reflux de ces eaux vers l'est, ce qui repousse vers le fond les eaux froides riches en nutriments.

Topex-Poseidon est un des satellites qui a permis de bien comprendre ce phénomène. Grâce à lui, on peut suivre l'évolution d'El Niño semaine après semaine (voir page ci-contre) et prévoir ainsi, avec six mois d'avance, son arrivée le long des côtes américaines.