

UE Sciences de la Terre :
« Système Terre, Climat, Energies »
L1 – PCST
Les alternances glaciaires
et interglaciaires du Quaternaire

Christophe COLIN

Christophe.colin@universite-paris-saclay.fr



Plan

I/ La découverte de l'existence de glaciation

II/ La théorie astronomique des climats

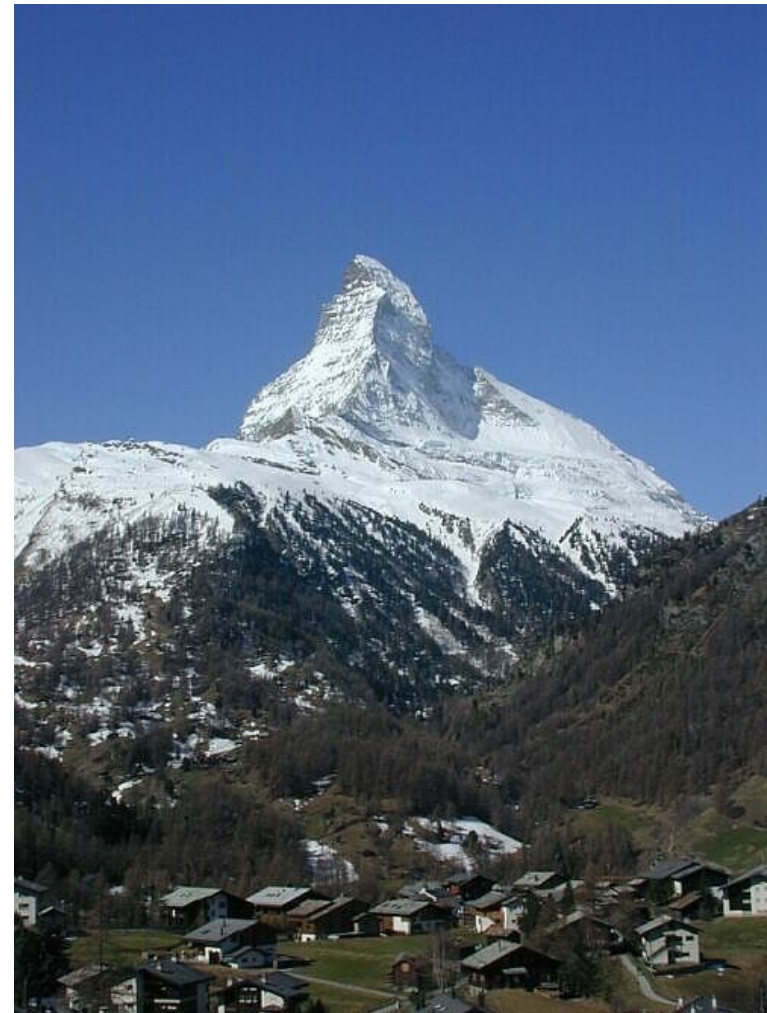
III/ Les preuves de l'existence de variations astronomiques dans les alternances glaciaires – interglaciaires

I/ La découverte de l'existence de glaciation

La démonstration de l'existence de glaciations Europe

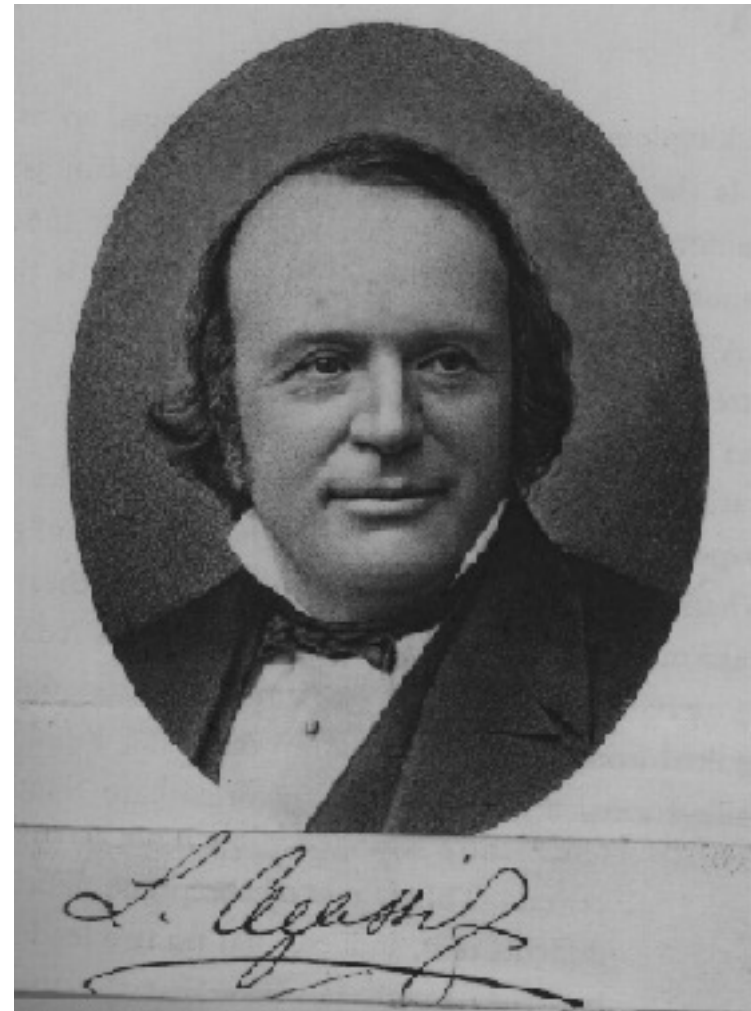
- Venetz et Agassiz ont mis en évidence dans les Alpes suisses, d'après des observations morphologiques, que les glaciers ont eu dans le passé une extension plus importante que ceux de l'actuelle.

Vallées en Auge (U), dépôts de moraines; blocs erratiques.



Louis Agassiz

- Louis Agassiz (1807-1873, géologue Suisse).





Grand Villard

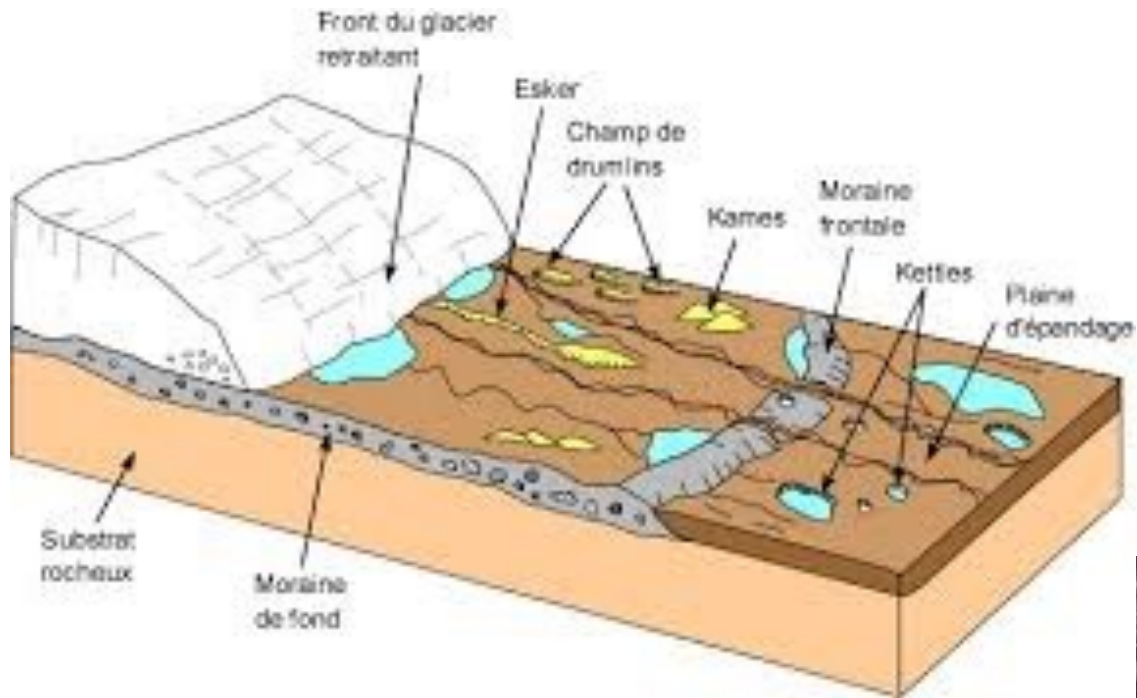
Cinq vallons du Dévoluy (Hautes Alpes)



Alpes vaudoises



L1 Système Terre, Climats Energies – CM5 : Les alternances glaciaires et interglaciaires du Quaternaire



Evidentes traces de glaciations passées

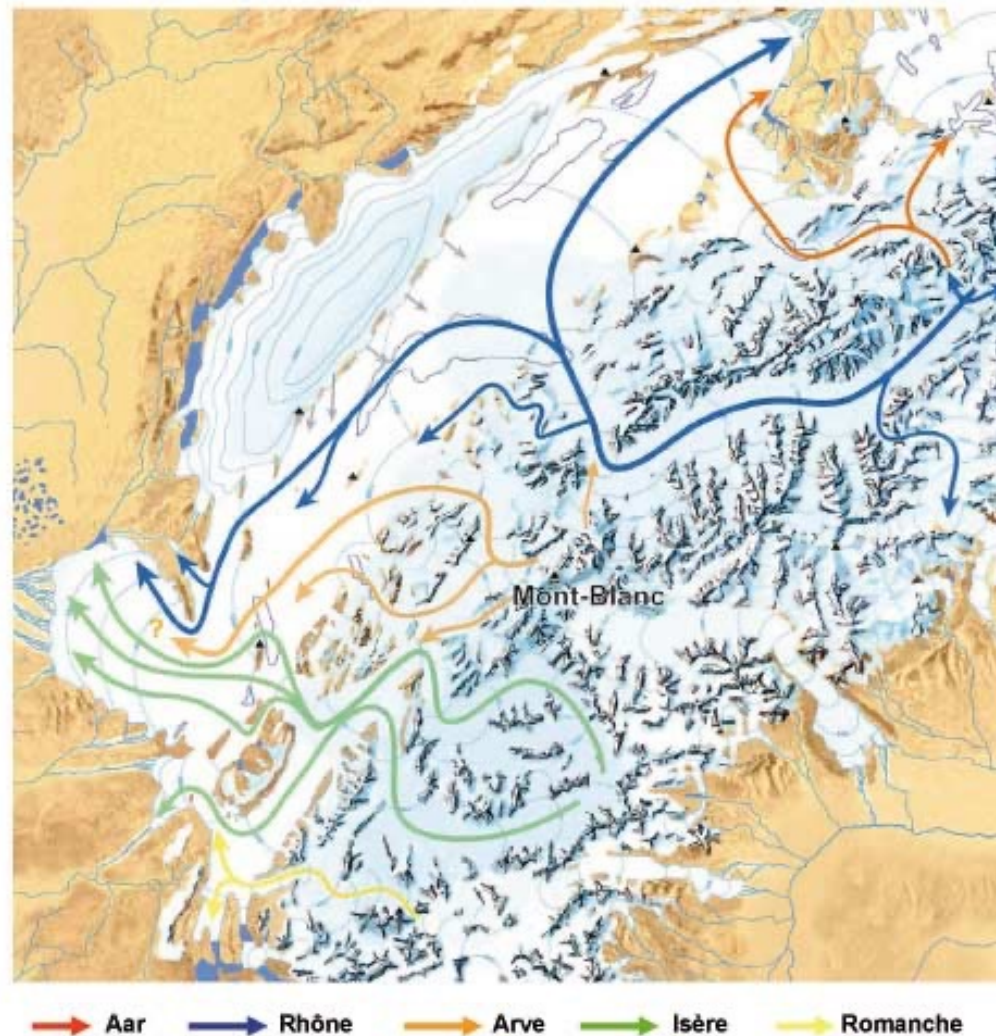
Blocs erratiques



Stries glaciaires



Carte de l'englacement des Alpes franco-suissees au maximum wurmien.

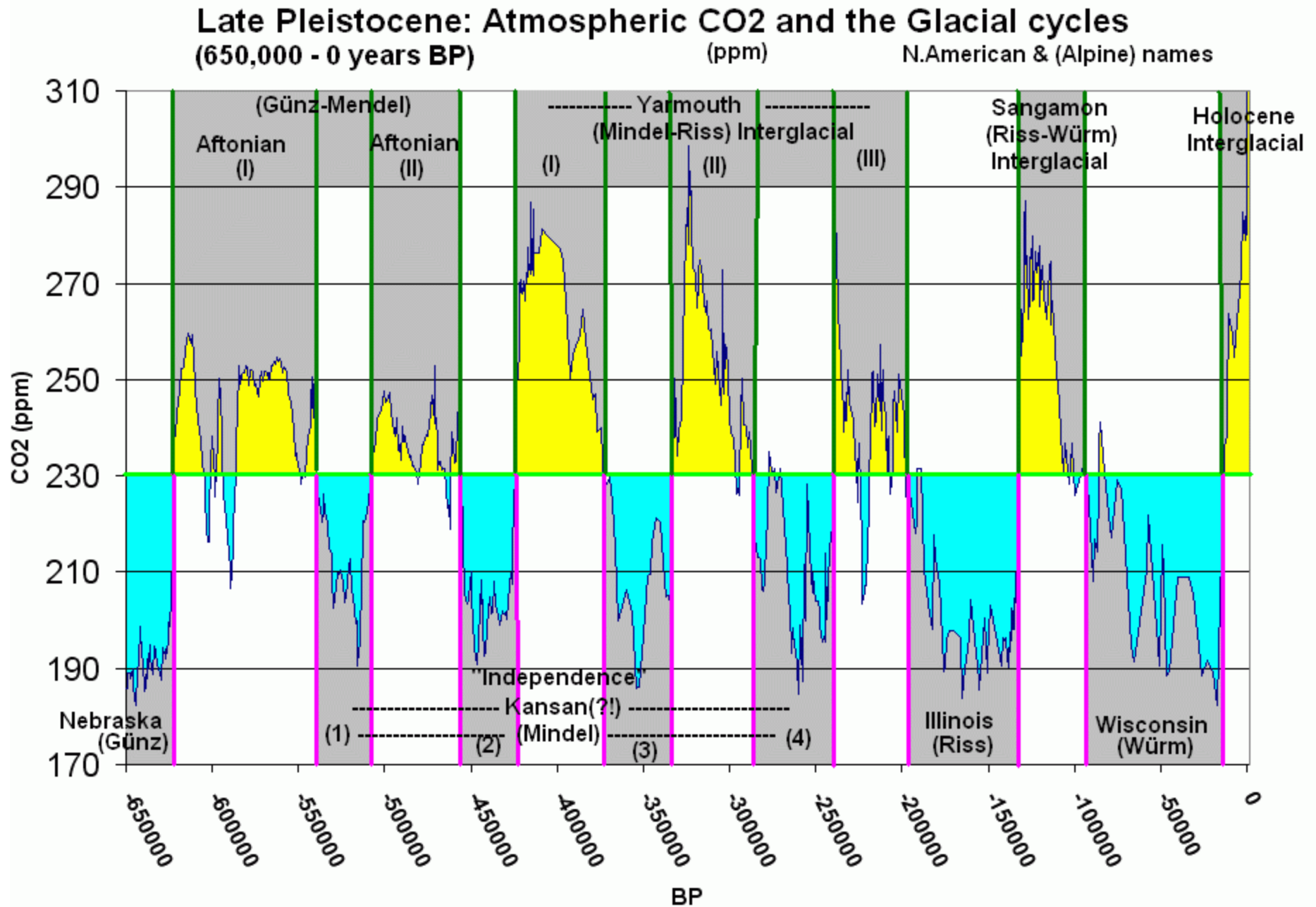


Cette carte des flux suggère que l'essentiel de la glace du lobe de piémont lyonnais (surface ~ 1800 km²) provient des zones d'alimentation (fond bleuté) par les bassins de l'Arve, de la Tarentaise et d'une partie de la Maurienne (surface ~ 3800 km²). Les glaces issues du bassin lémanique n'ont généré qu'une étroite bande au nord-est du lobe de piémont (S Coutterand, 2007).

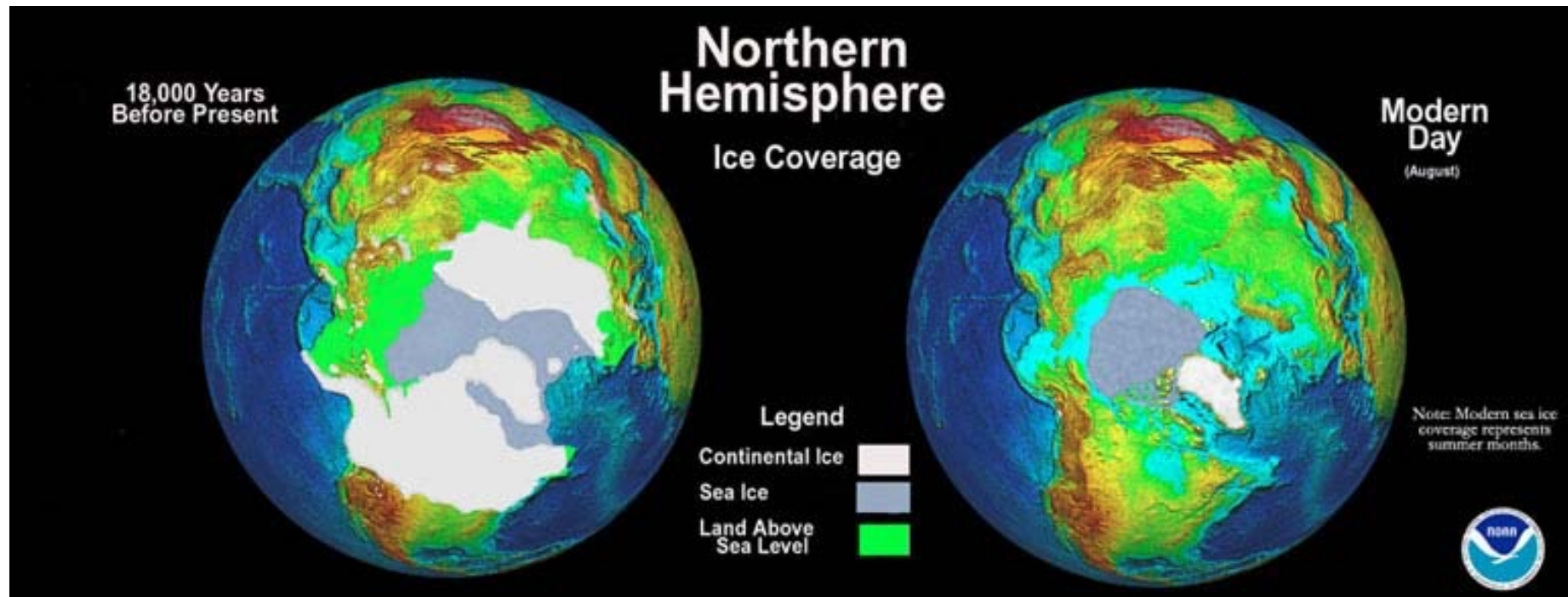
Existences de glaciations en Amérique du Nord

- Les géologues ont ensuite reconnu des glaciations en Europe et en Amérique du Nord (Finger Lakes).
- Au début du XX^{ème} siècle, ils réalisent qu'il y a plus d'une période glaciaire; 4 périodes glaciaires ont été reconnues (stades de Günz, de Mindel, de Riss et de Würm).

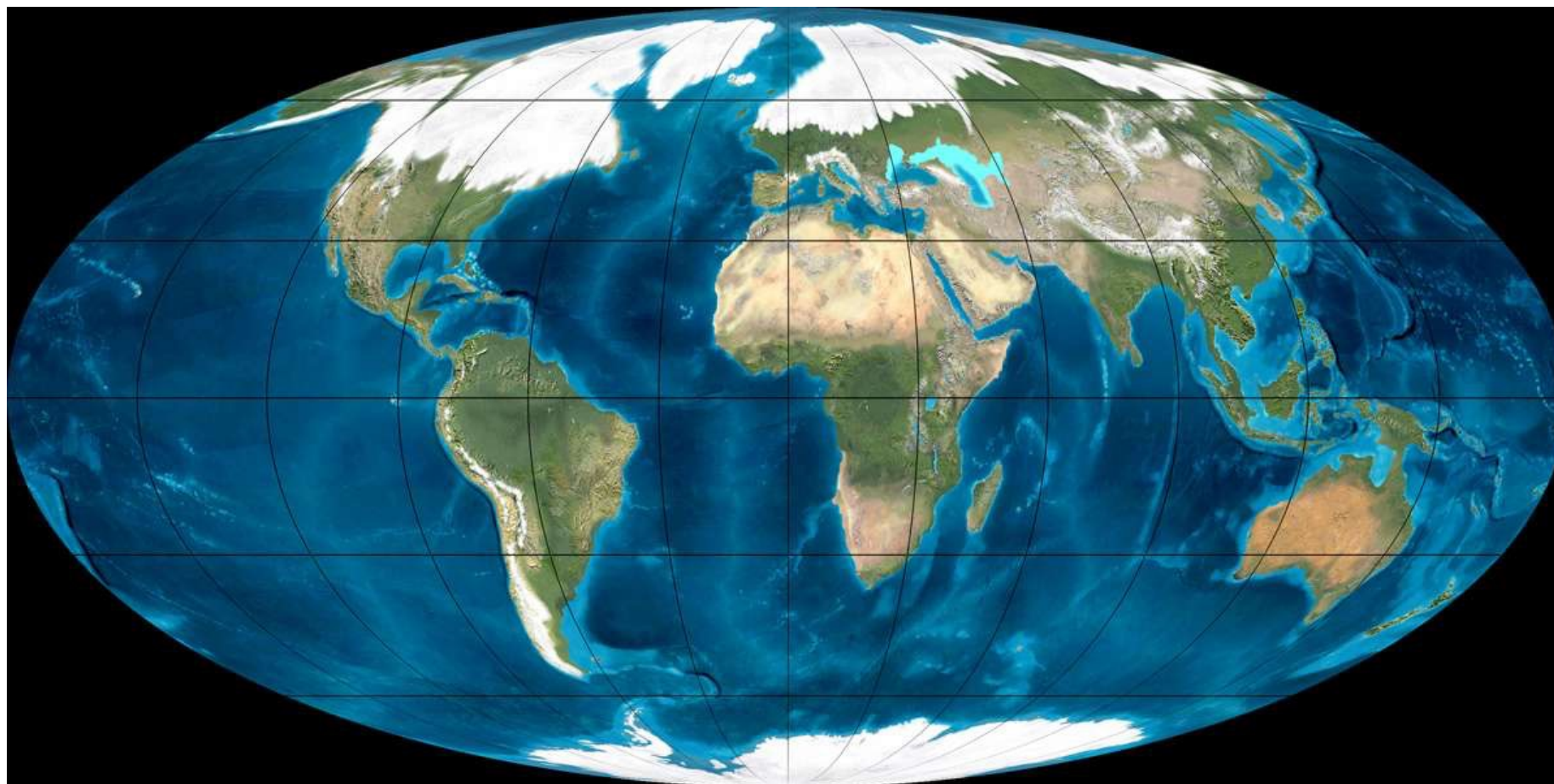




Extension des glaciations dans l'hémisphère Nord

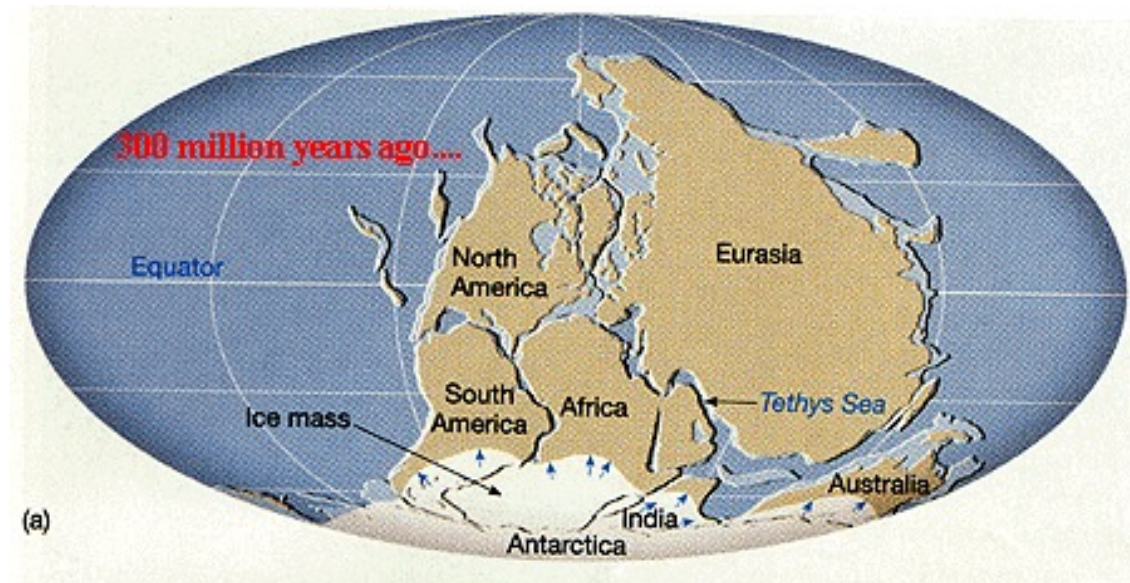


L1 Système Terre, Climats Energies – CM5 : Les alternances glaciaires et interglaciaires du Quaternaire



Questions subsistantes?

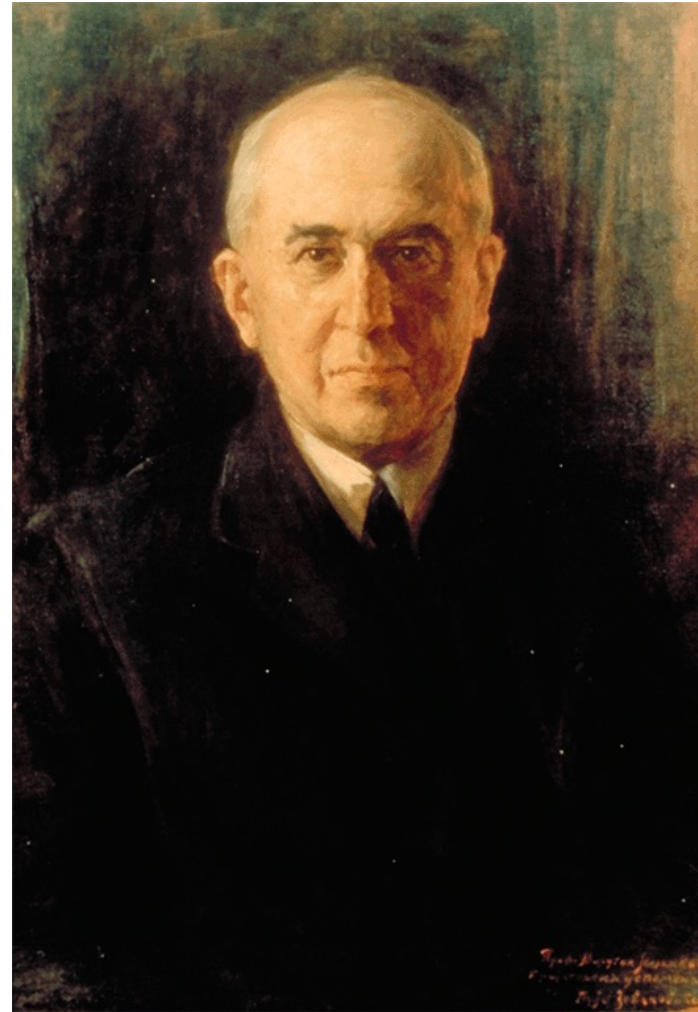
- Les géologues ont mis en évidence que ces glaciations étaient récentes (derniers Ma), mais ils n'ont pas déterminé exactement la chronologie de ces événements glaciaires.
- Ils ont aussi mis en évidence qu'il y a eu des glaciations dans le passé, comme par exemple vers 300 Ma
- Questions : qu'elle est la cause de ces glaciations? Qu'elle est la chronologie de ces changements climatiques?



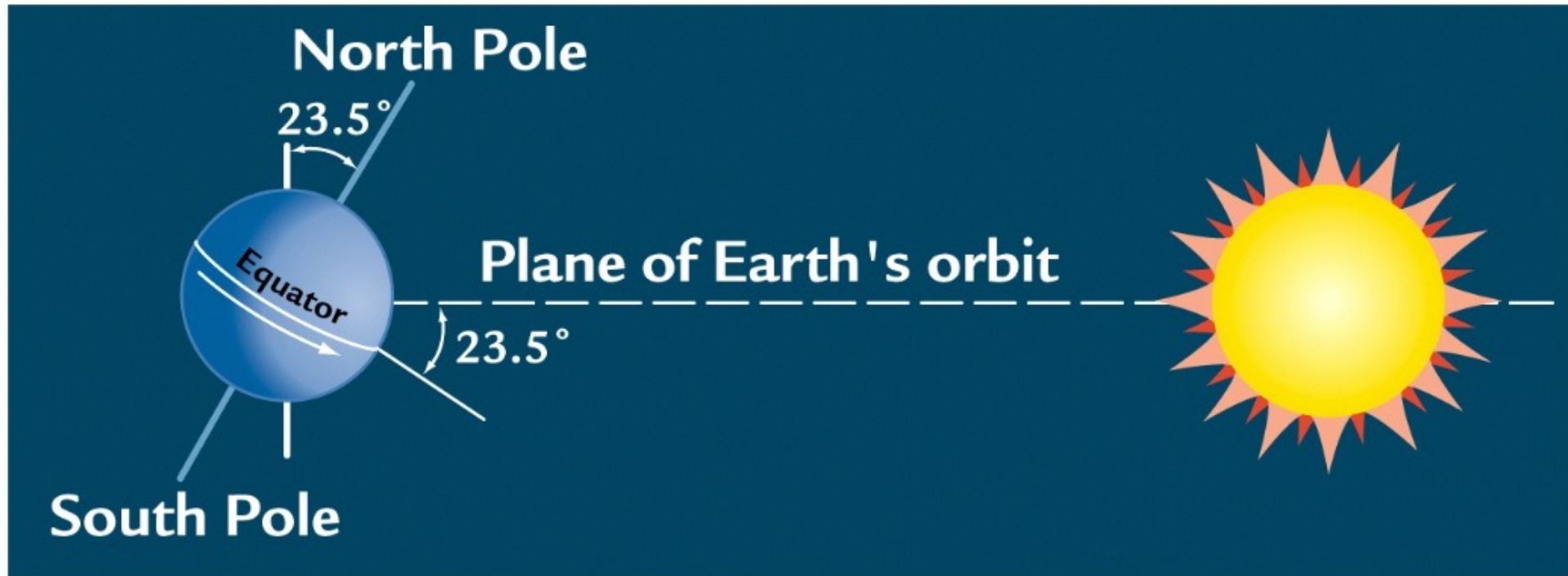
II/ La théorie astronomique des climats

L'idée de Milankovitch

- Vers les années 1915
l'astronome Serbe
Milutin Milankovitch,
suggère que les périodes
de glaciations étaient
induites par des
changements dans les
paramètres de l'orbite
terrestre



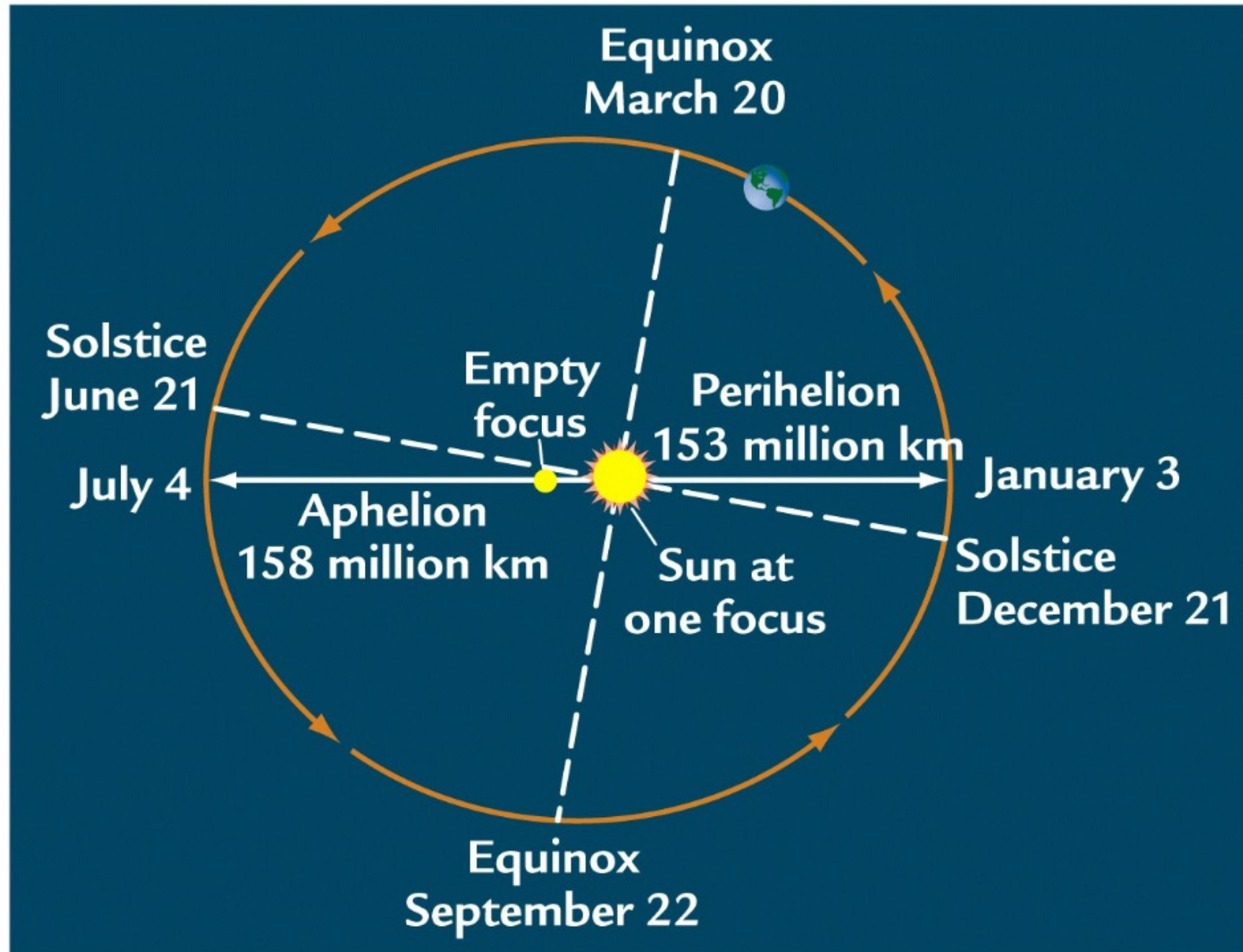
Milutin Milankovitch



Obliquité / angle par rapport au plan de l'écliptique

L'écliptique est le plan dans lequel la Terre se déplace autour du soleil

**L'obliquité => Différences tps jour/nuit +
Responsables des saisons**



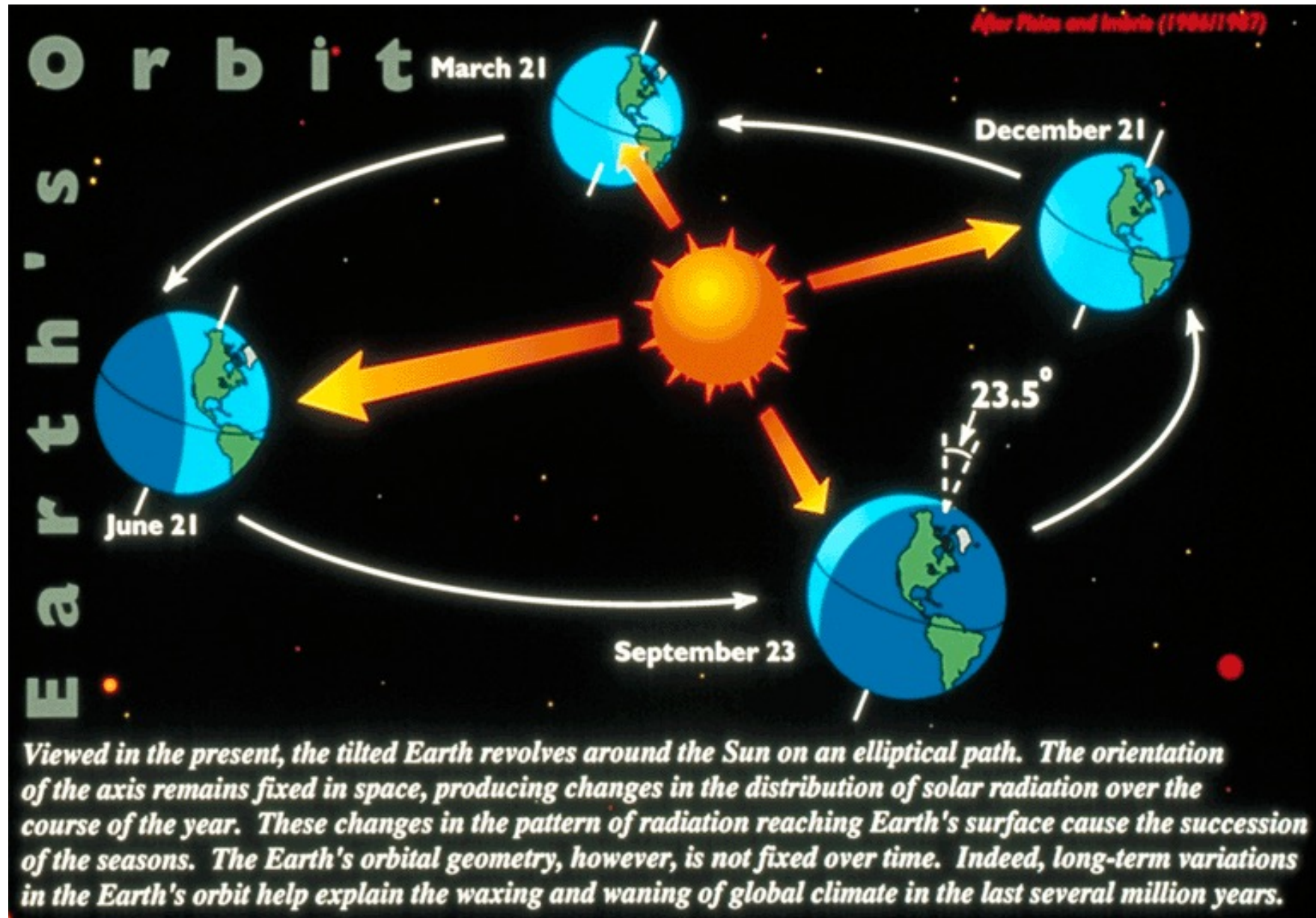
Solstices E+H : Angles entre cercle d'illumination et axe passant les pôles maximum
Inégalités jour/nuit maximum

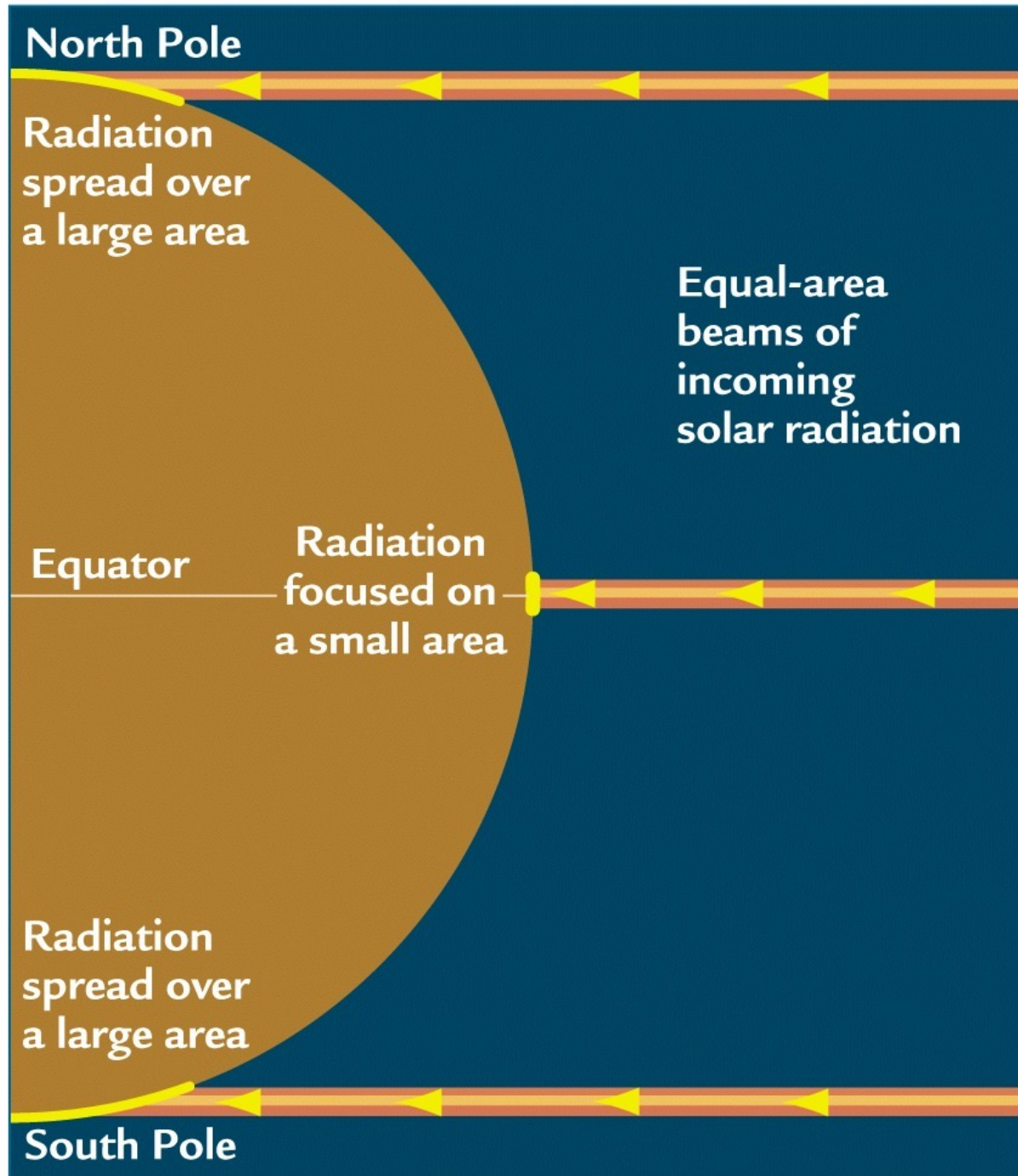
Equinoxes P+A : Le cercle d'illumination passe par les pôles
Durée du jour = nuit

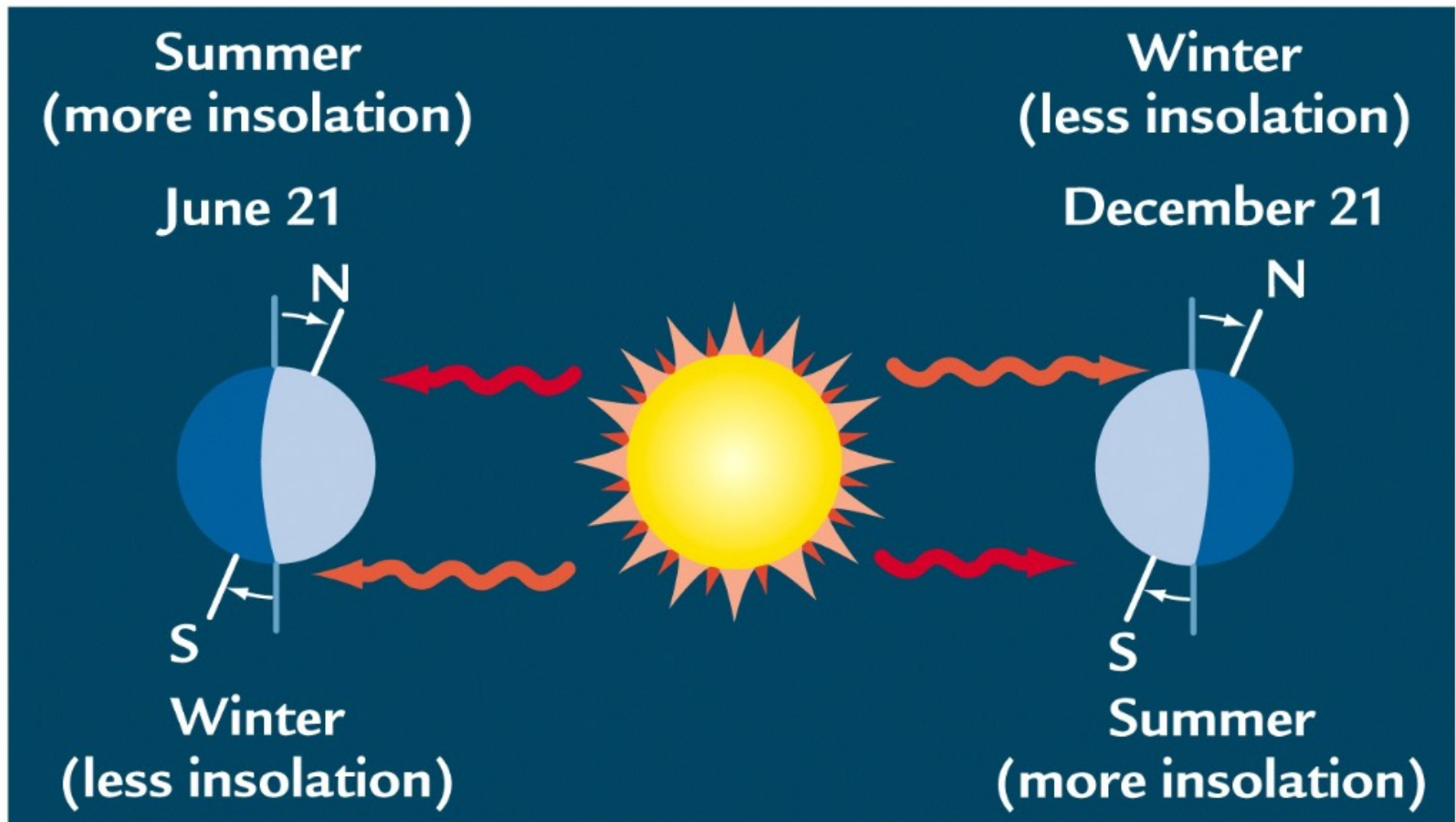
Aphélie : distance Terre/soleil maximum

Périhélie : distance Terre/soleil minimum

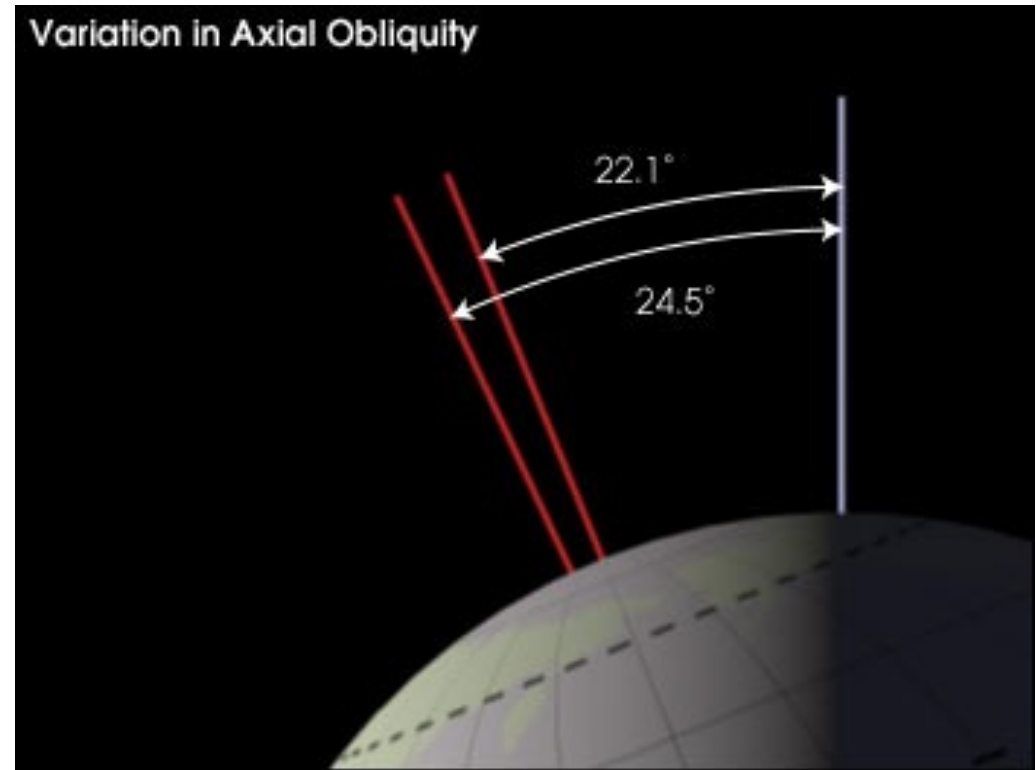
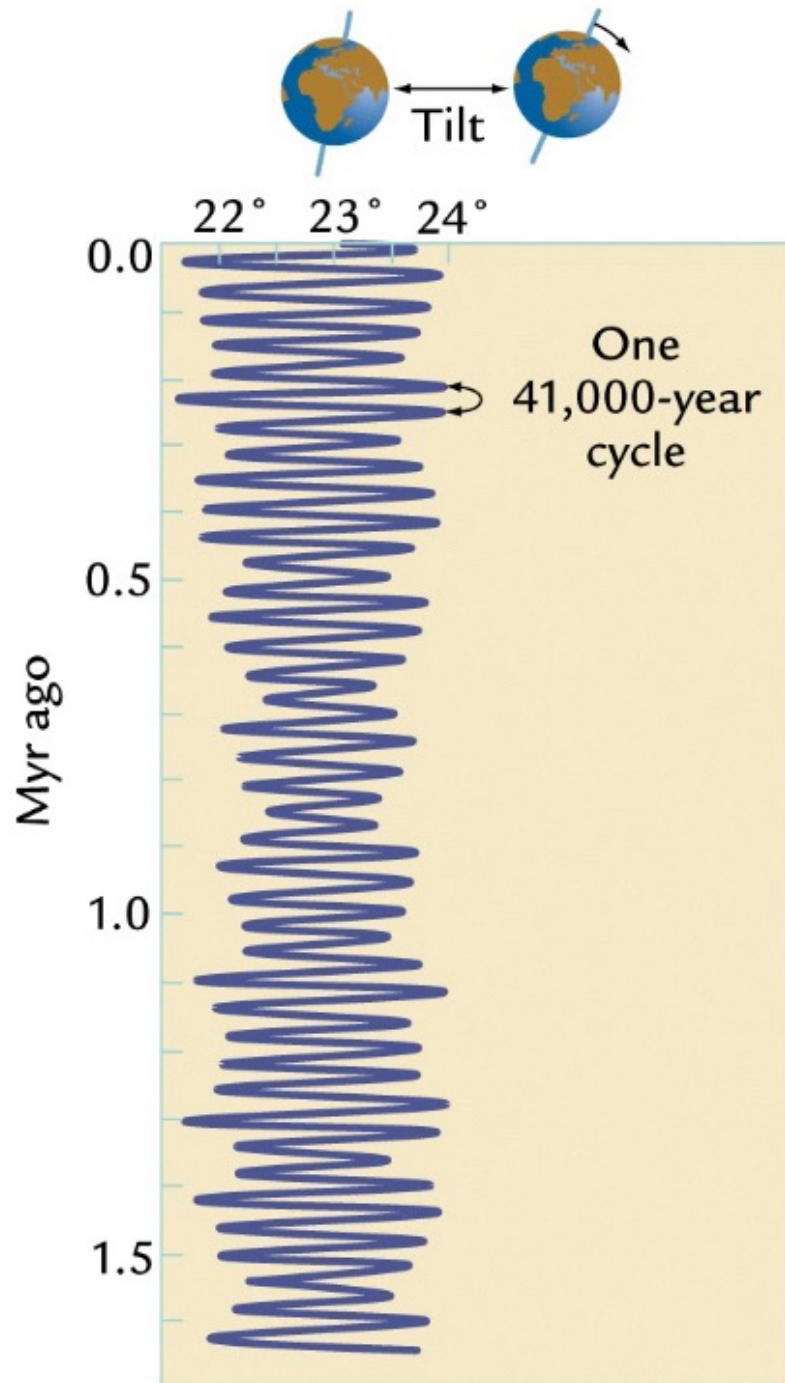
Saisons







L'obliquité



- **L'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan de l'écliptique varie entre 22,1° et 24,5° suivant une périodicité de 41 000 ans. (valeur actuelle : 23,5°)**

L'obliquité

Une augmentation de l'obliquité:

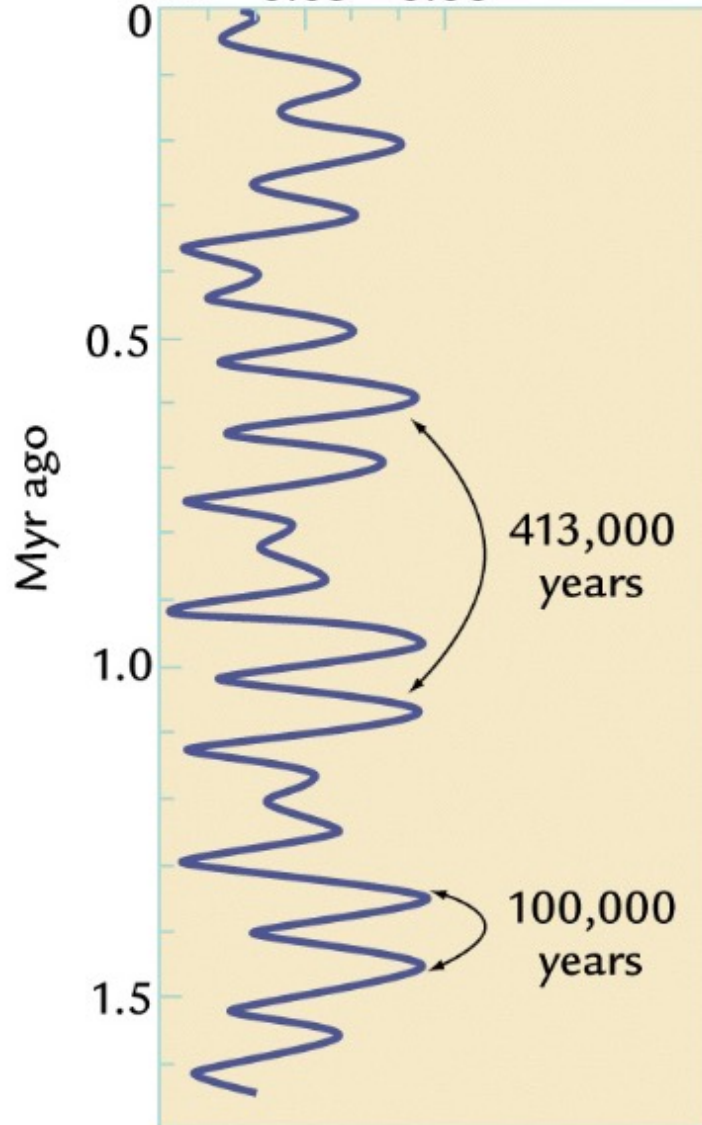
-atténue les contrastes climatiques entre les hautes et les basses latitudes puisque d'avantage de rayonnement est reçu au pôle et moins à l'équateur

- augmente les contrastes saisonniers (augmente l'inégalité jour/nuit)

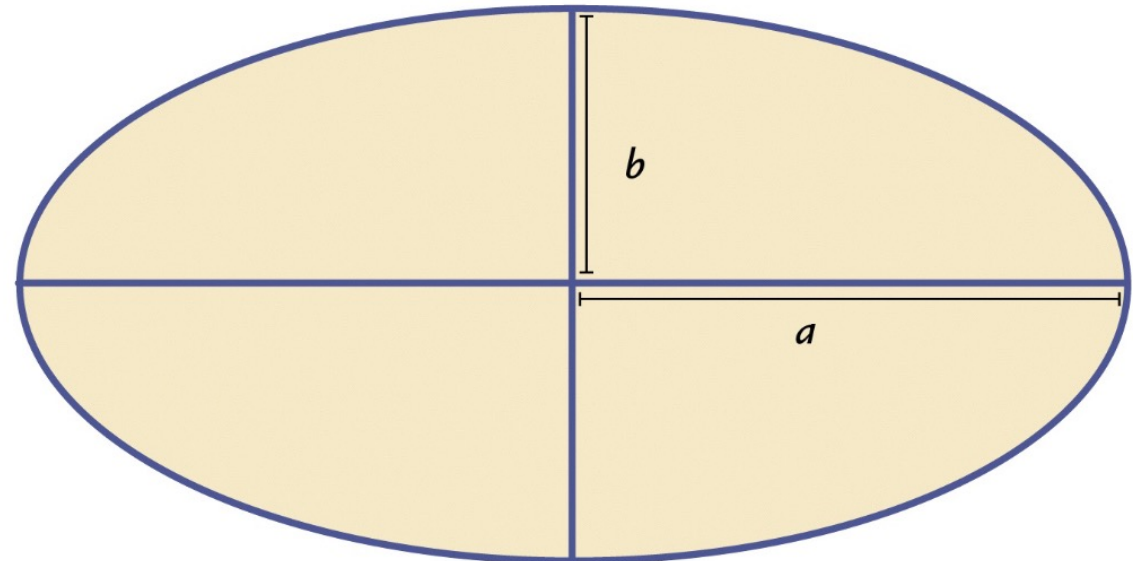


Eccentricity

0.00 0.03 0.06



Excentricité de l'orbite terrestre

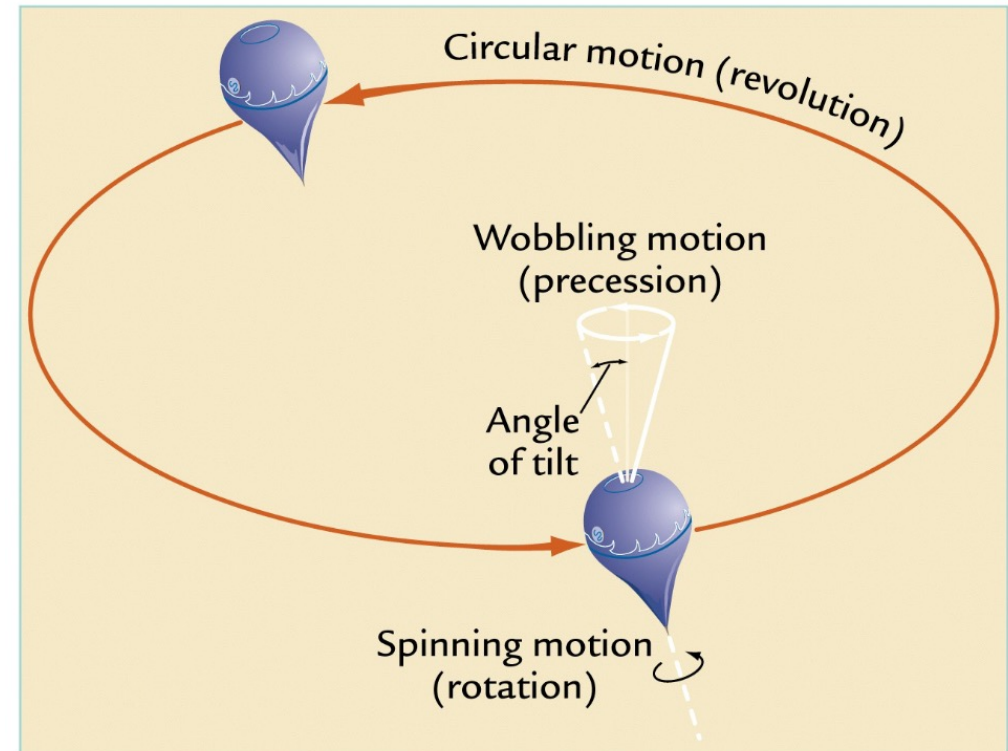
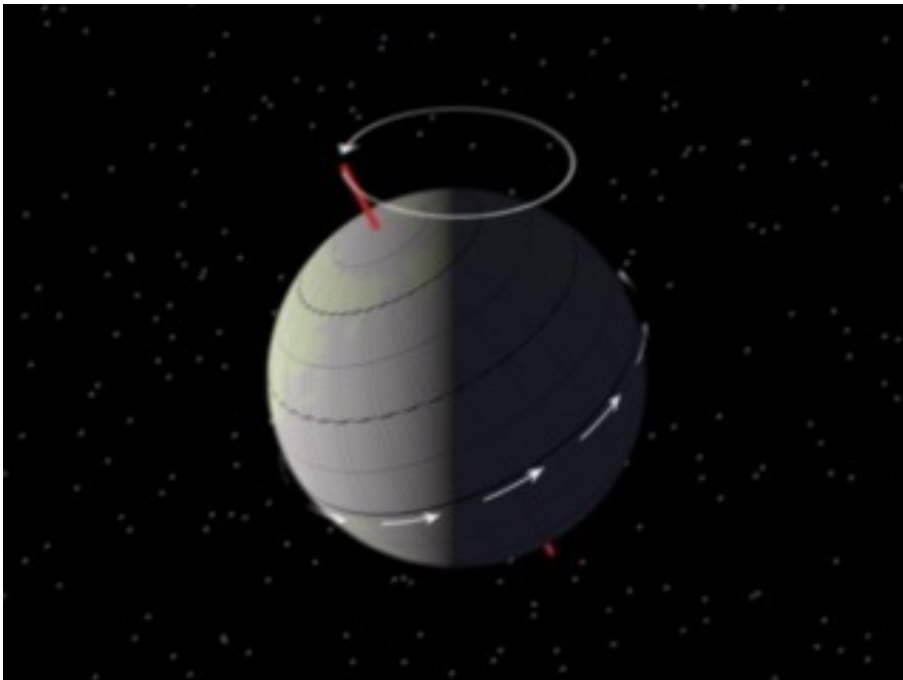


$$\text{Eccentricity } \varepsilon = \frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a}$$

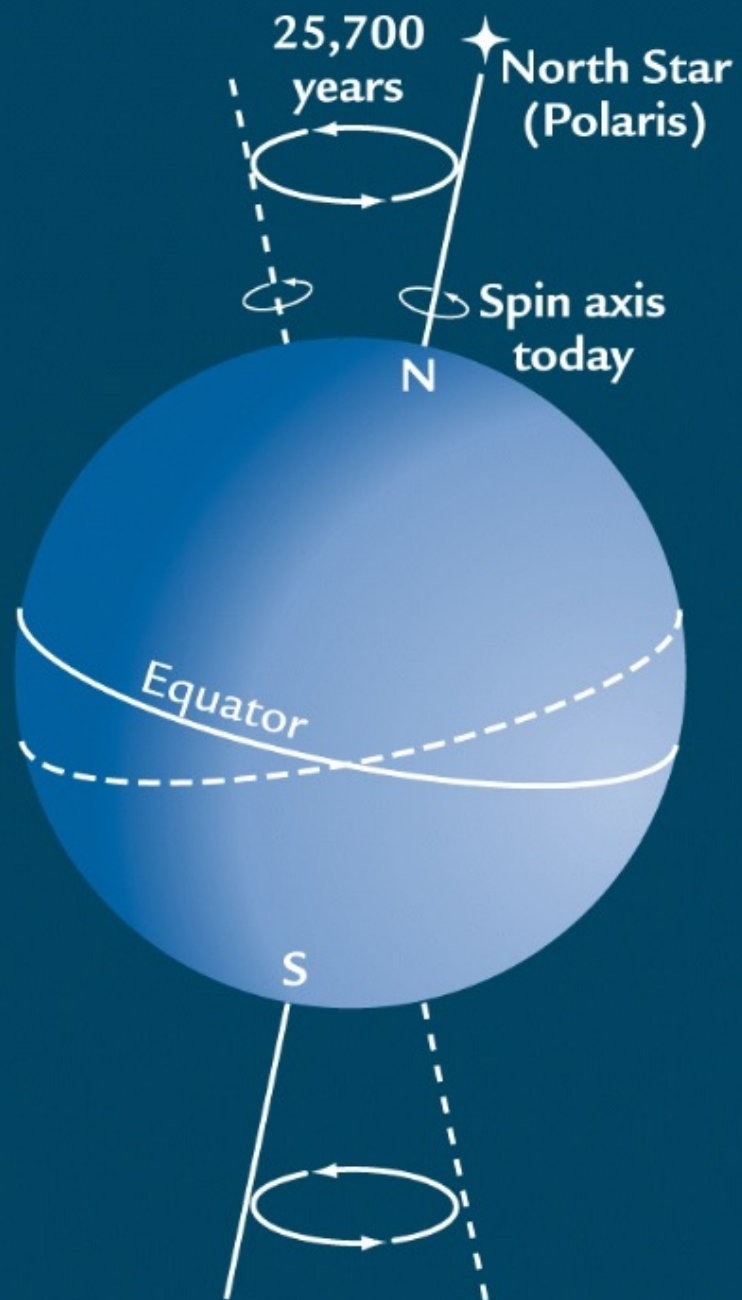
- **La forme de l'orbite varie dans le temps depuis un cercle ($e=0$) parfait jusqu'à une ellipse ($e=0,06$) suivant des cyclicités à 100 000 et 400 000 ans. (valeur actuelle, $e=0,0167$)**

Précession

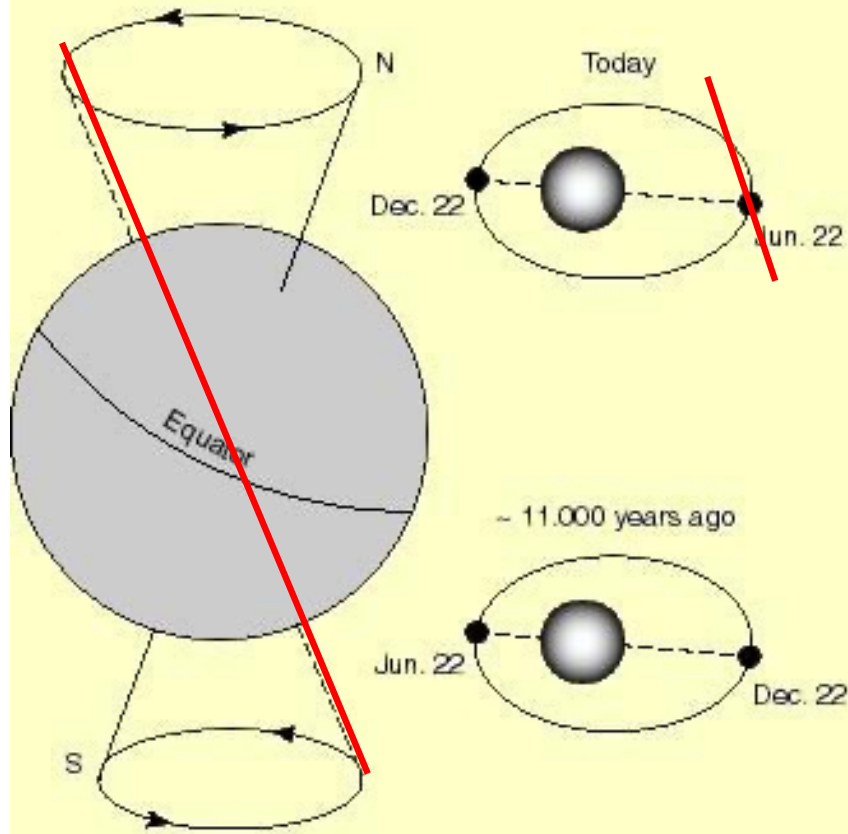
- La précession correspond au changement de l'orientation de l'axe rotationnel de la Terre au cours du temps suivant un mouvement de toupille.
- Cyclicité à 23 000 ans.



Precession
of Earth's
spin axis
(wobble)



A. Precession of the equinoxes



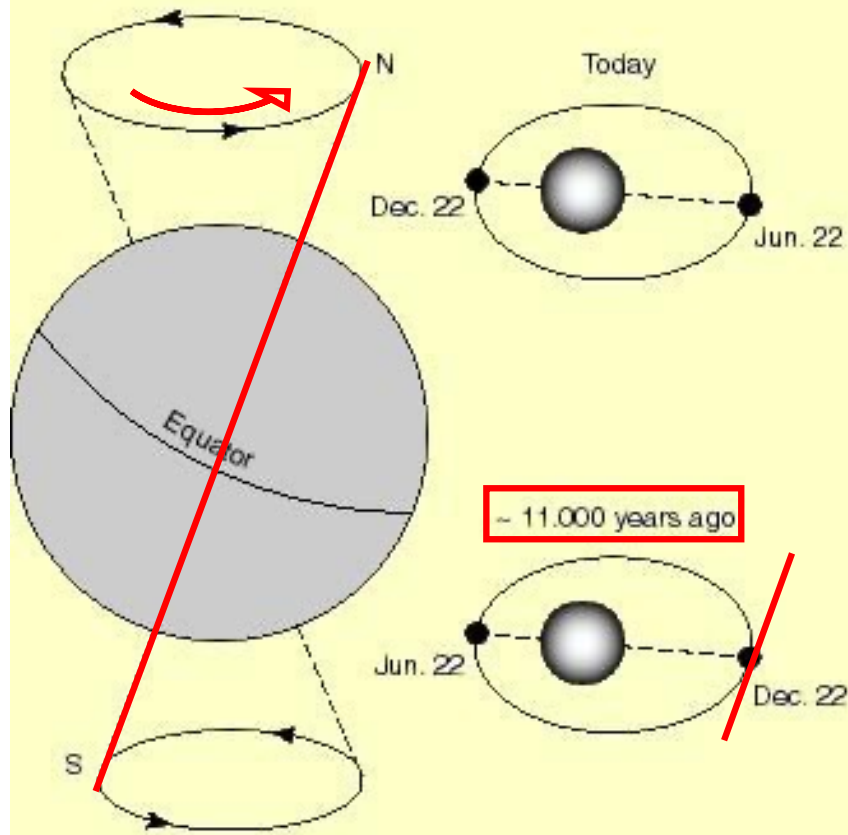
(average period ~ 22,000 years)

Précession Aujourd'hui

Décembre: le plus près du soleil
N-hémisphère - hiver **tiède**
S-hémisphère - été **chaud**

Juin: le plus loin du soleil
N-hémisphère été **frais**
S-hémisphère hiver **froid**

A. Precession of the equinoxes



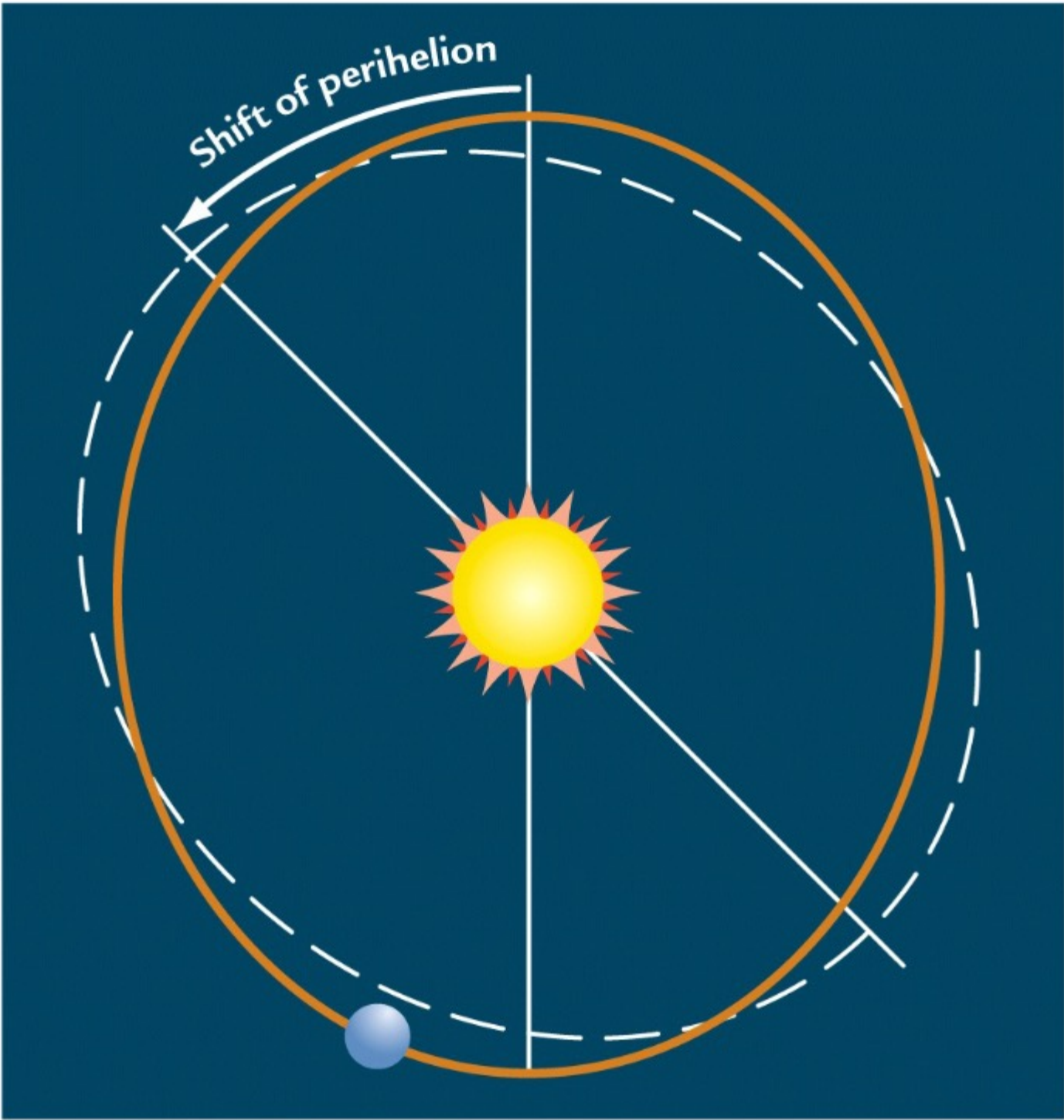
(average period ~ 22,000 years)

Précession

Il y a ~11 kyr

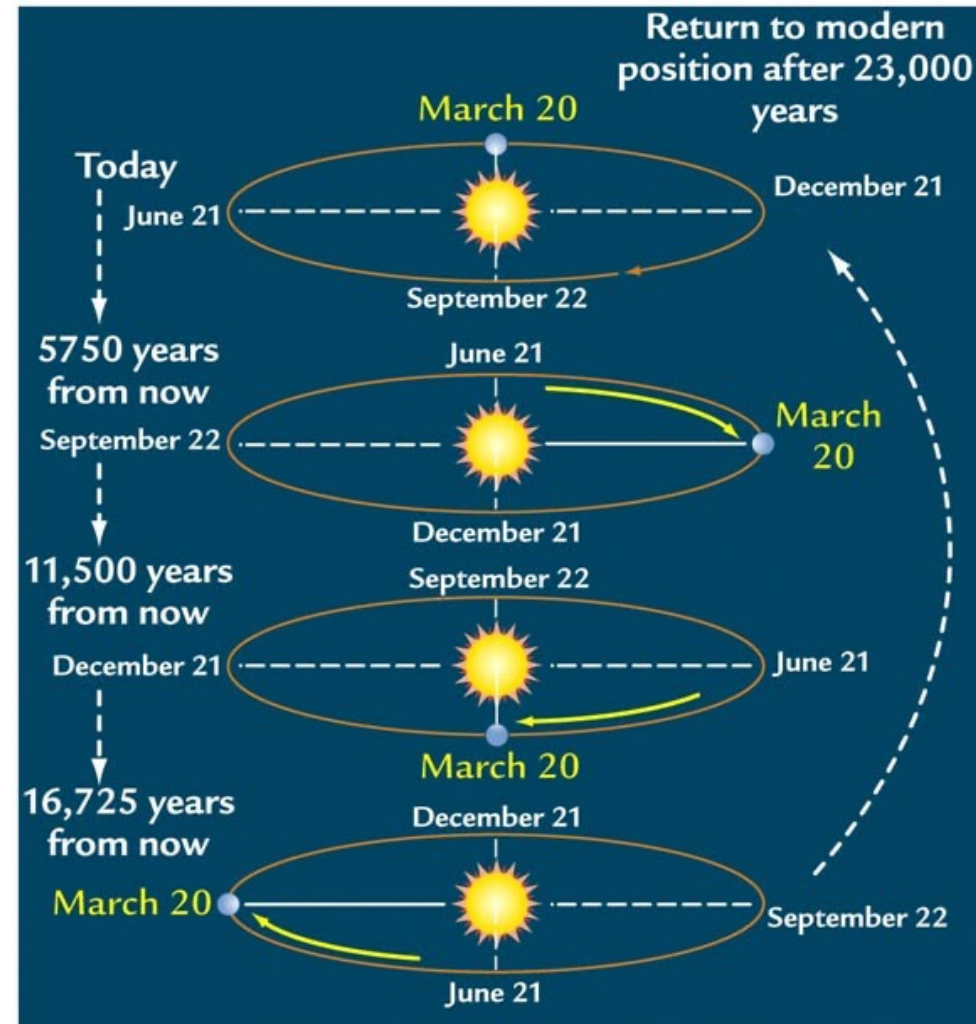
Jun: le plus près du soleil
N-hémisphère - été **chaud**
S-hémisphère - hiver **tiède**

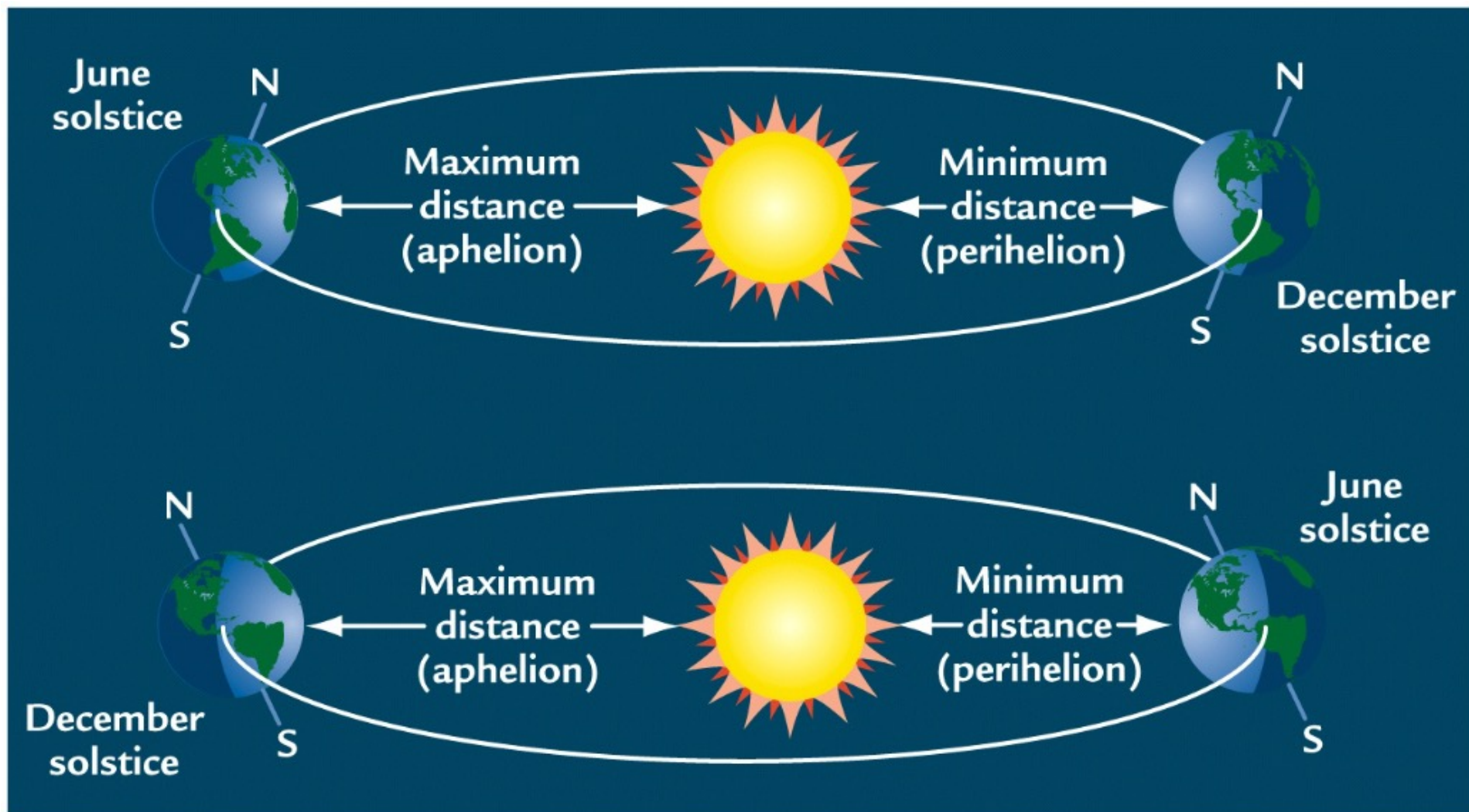
Décembre: le plus loin du soleil
N-hémisphère - hiver **froid**
S-hémisphère - été **frais**

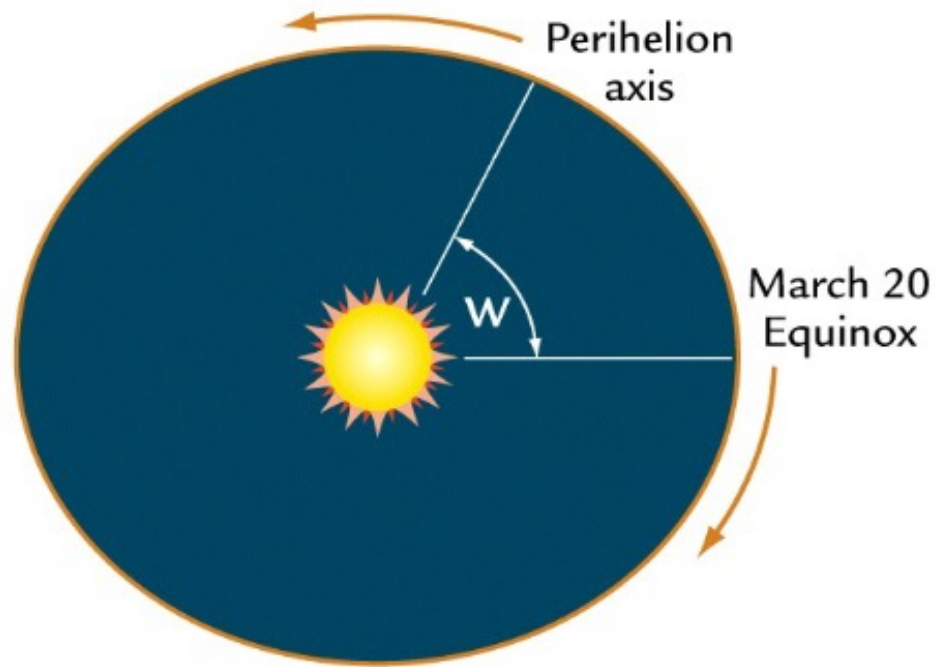


Importance de la Précession

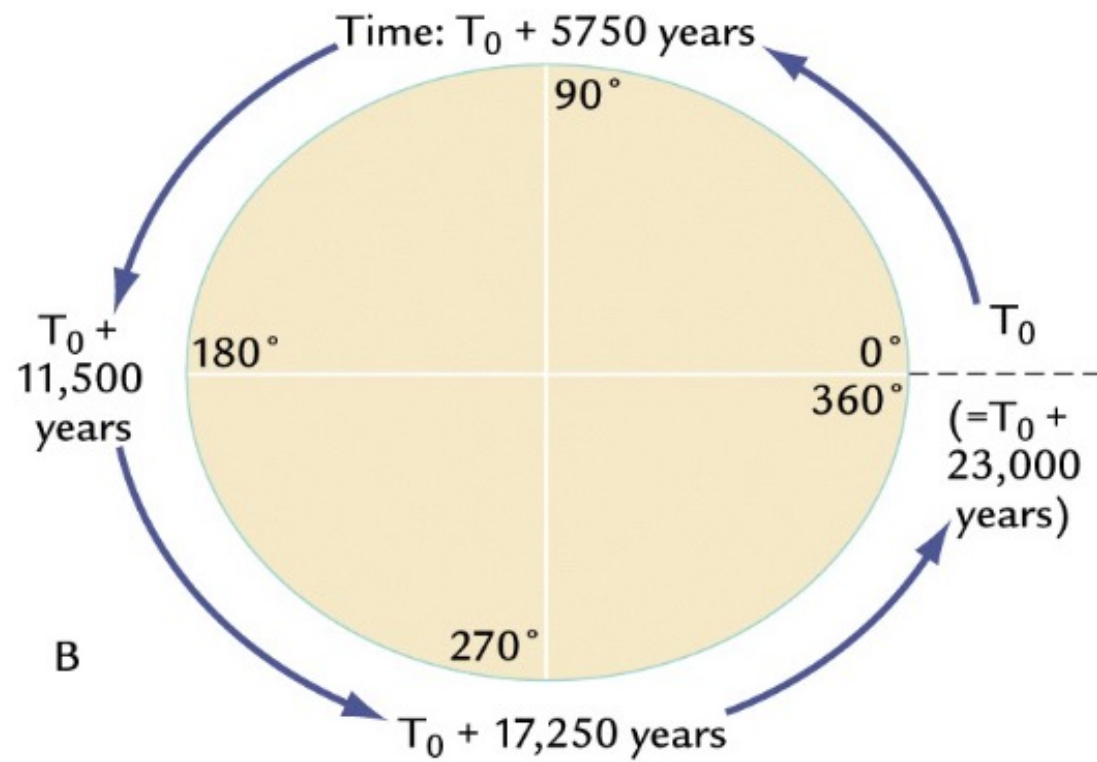
- La précession déplace les saisons (été et hiver) de façon à ce que la terre soit proche (périhélion) ou distante du soleil (aphélie).







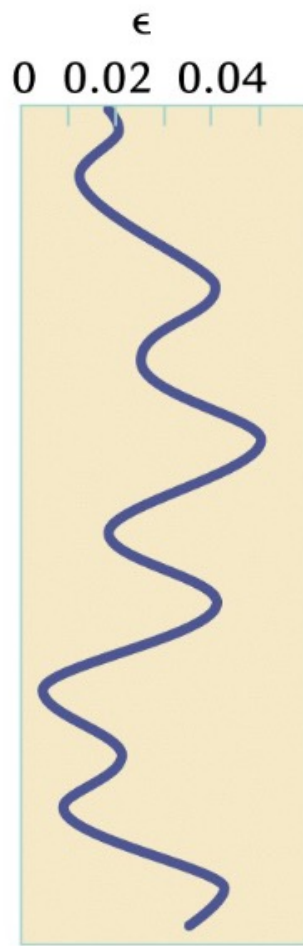
A





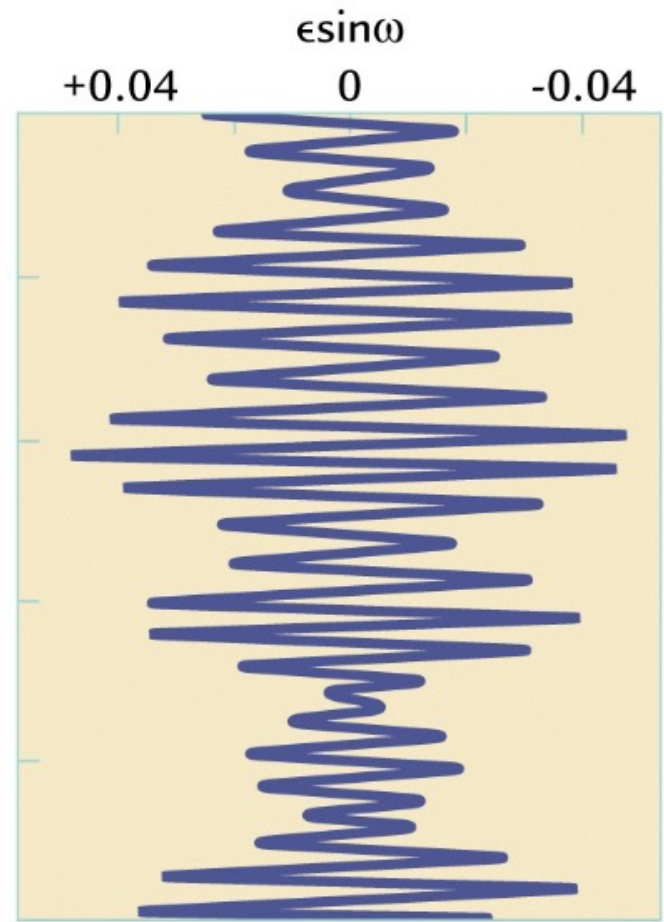
Angular motion of precession (23,000 years)

x

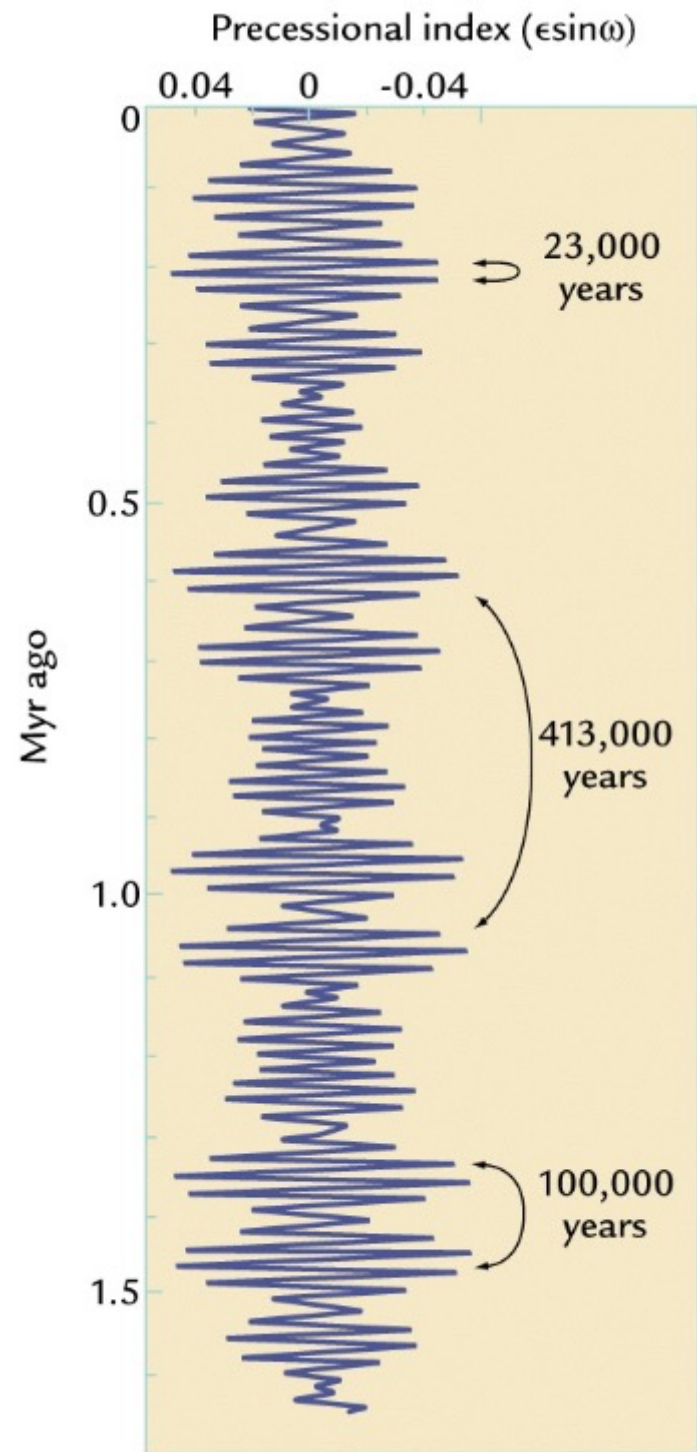


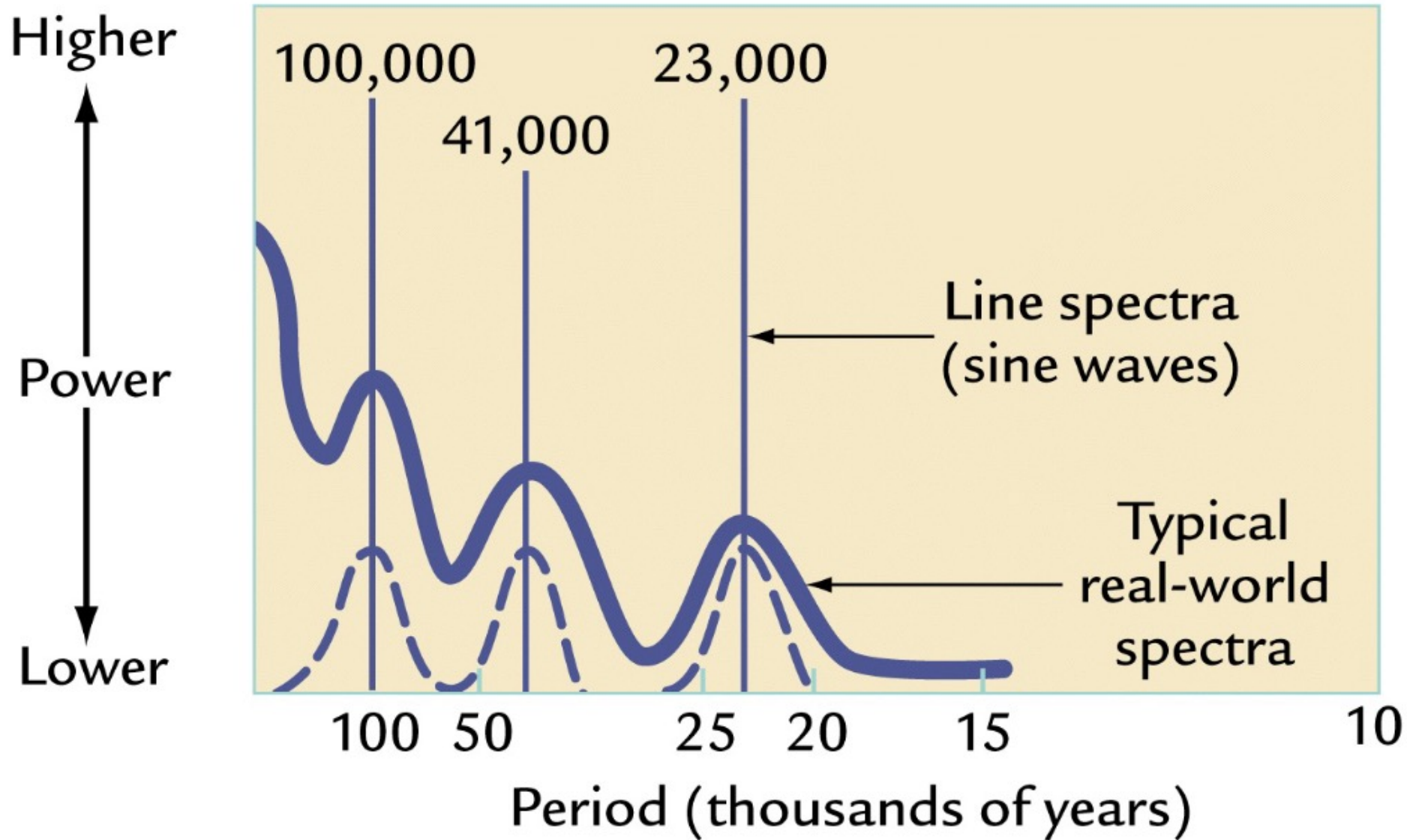
Eccentricity (100,000 years)

=



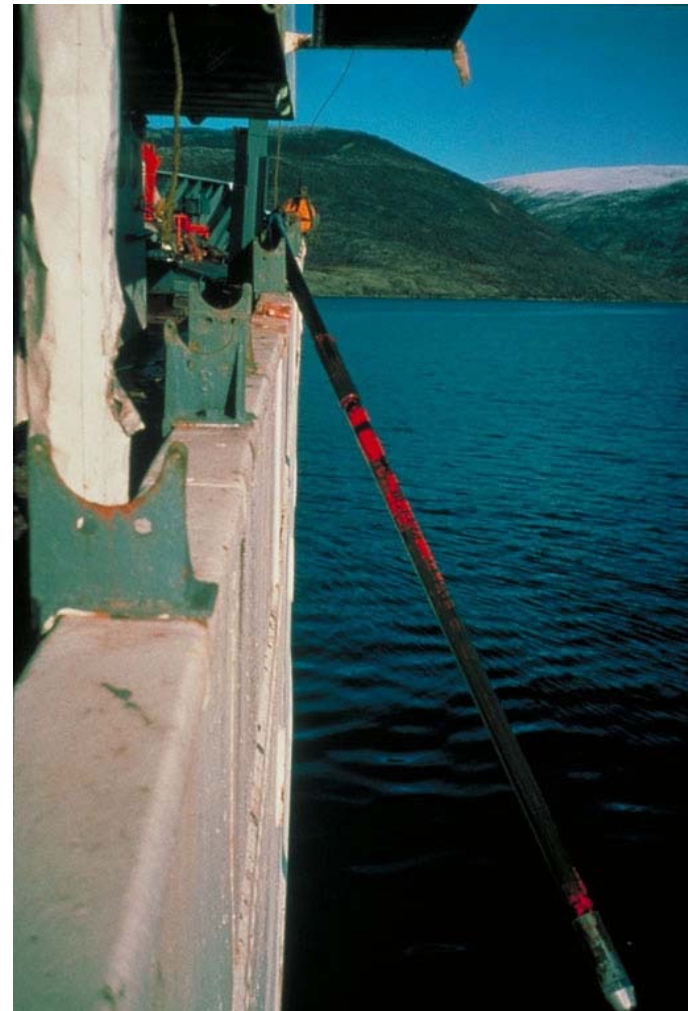
Eccentricity-modulated precession (23,000 years)

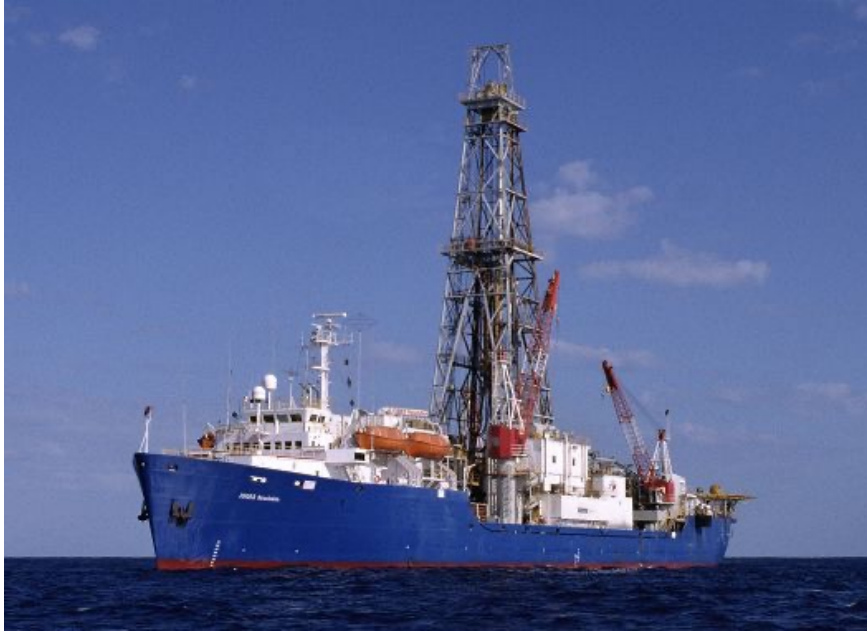




Comment peut-on tester l'idée de Milankovitch?

- La solution réside dans l'établissement d'une chronologie des alternances climatiques.
 - La théorie de Milankovitch est démontrée, si les alternances glaciaires-interglaciaires se produisent suivant les cyclicités orbitales.
- Comment établir la chronologie des événements glaciaires?
 - A terre les glaciations sont destructives - chaque glaciation détruit les preuves des glaciations précédentes.
 - Les sédiments marins ont été la clé du problème / enregistrements continus
 - Comment peut-on tracer les changements climatiques dans les sédiments marins?





Joides Résolution (ODP, IODP)

Marion Dufresnes
(IMAGES)





Navire chinois de forage
océanique Mengxiang

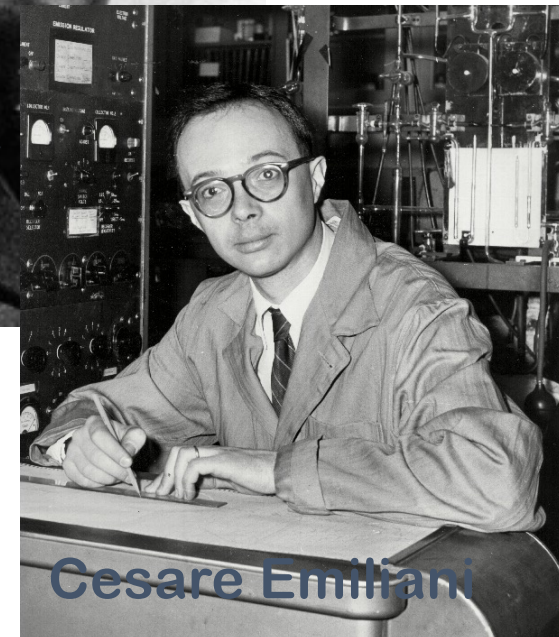
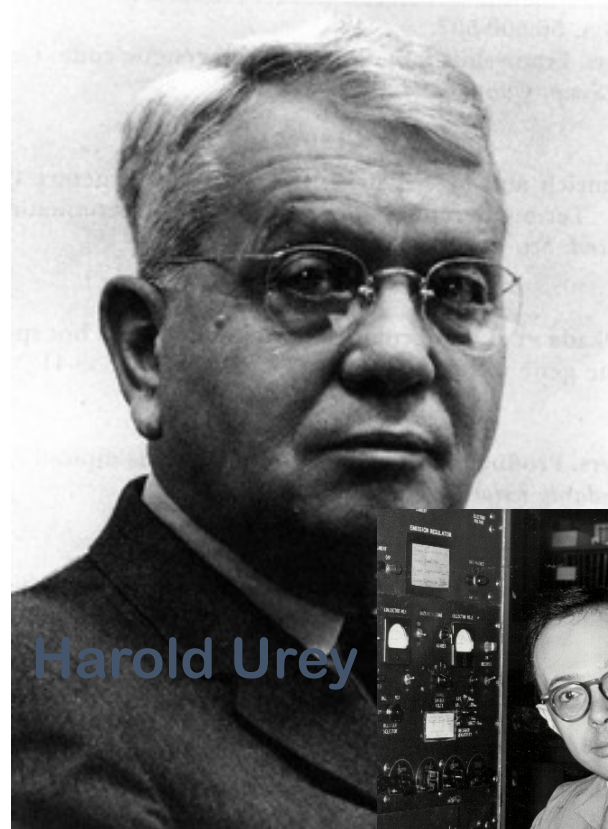


Navire scientifique
japonais de forage -
Chikyu

III/ Les preuves de l'existence de variations astronomiques dans les alternances glaciaires – inter-glaciaires

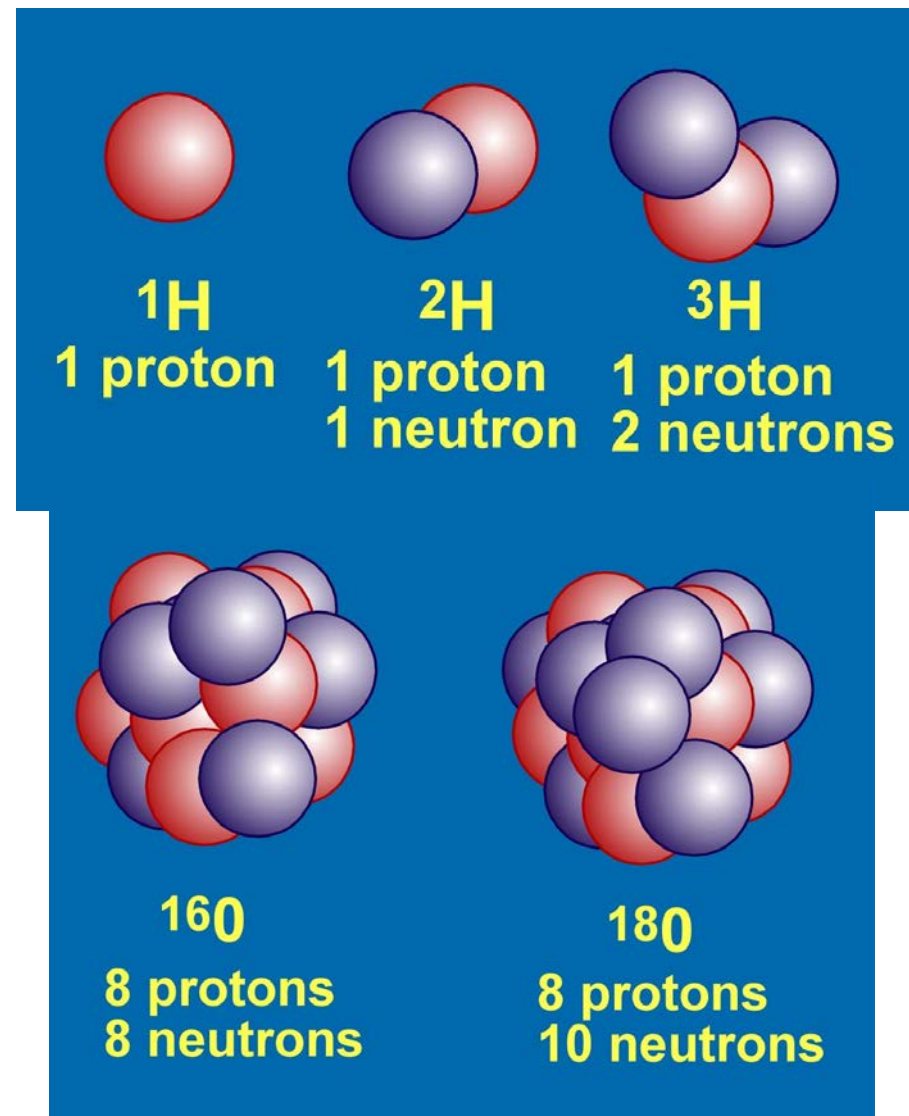
Comment tester La théorie de Milankovitch

- En 1947, Harold Urey (physicien et prix Nobel) prédit que l'incorporation des différents isotopes de l'O dans la calcite des organismes devrait dépendre de la T°C.
- L'étude de sédiments marins devrait permettre de tester l'hypothèse de Milankovitch.
- Cesare Emiliani (étudiant en thèse) est en charge de la démonstration



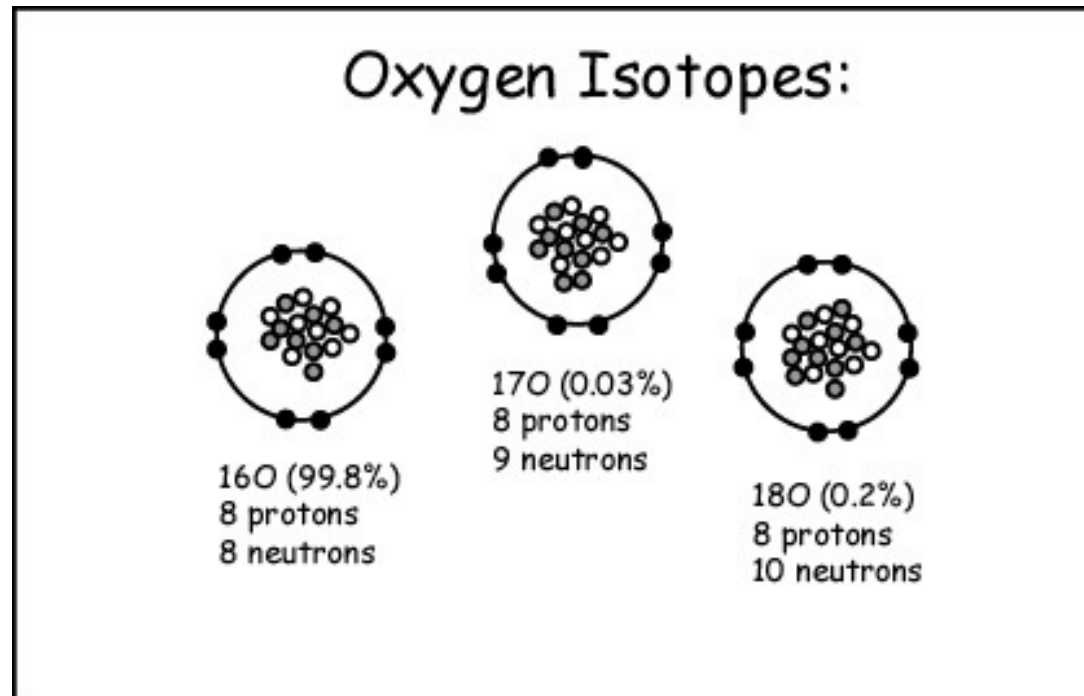
Les isotopes de l'oxygène: paléothermomètre

- A quoi correspondent des isotopes?
 - Les isotopes correspondent à un même élément ayant différent nombre de neutrons - différentes masses. Par exemple, il y a 3 isotopes de l'élément Hydrogène (^3H n'est pas stable).
 - Oxygène a deux isotopes majeurs.
 - Une différence de masse entraîne un comportement géochimique différent..



Oxygène "Normal" (léger)
8 Protons, 8 Neutrons
16 = masse totale ^{16}O
Oxygène rare (lourd)
8 Protons, 10 Neutrons
18 = masse totale ^{18}O

Mesure du rapport: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$



$$\text{Delta } ^{18}\text{O} = \delta^{18}\text{O}$$

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ sample} - \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ standard}}{\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ standard}} \right] \times 1000 \text{ ‰}$$

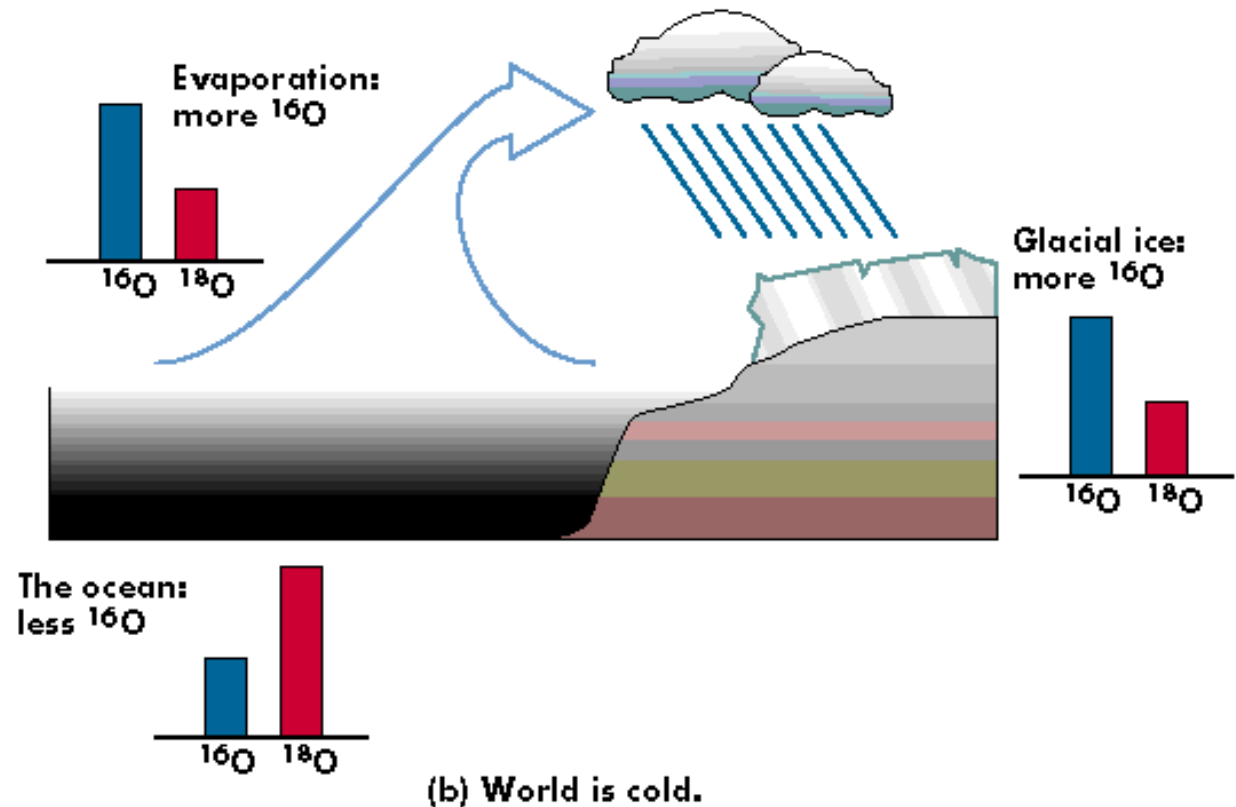
¹⁸Oxygen Standard: PDB and “SMOW”

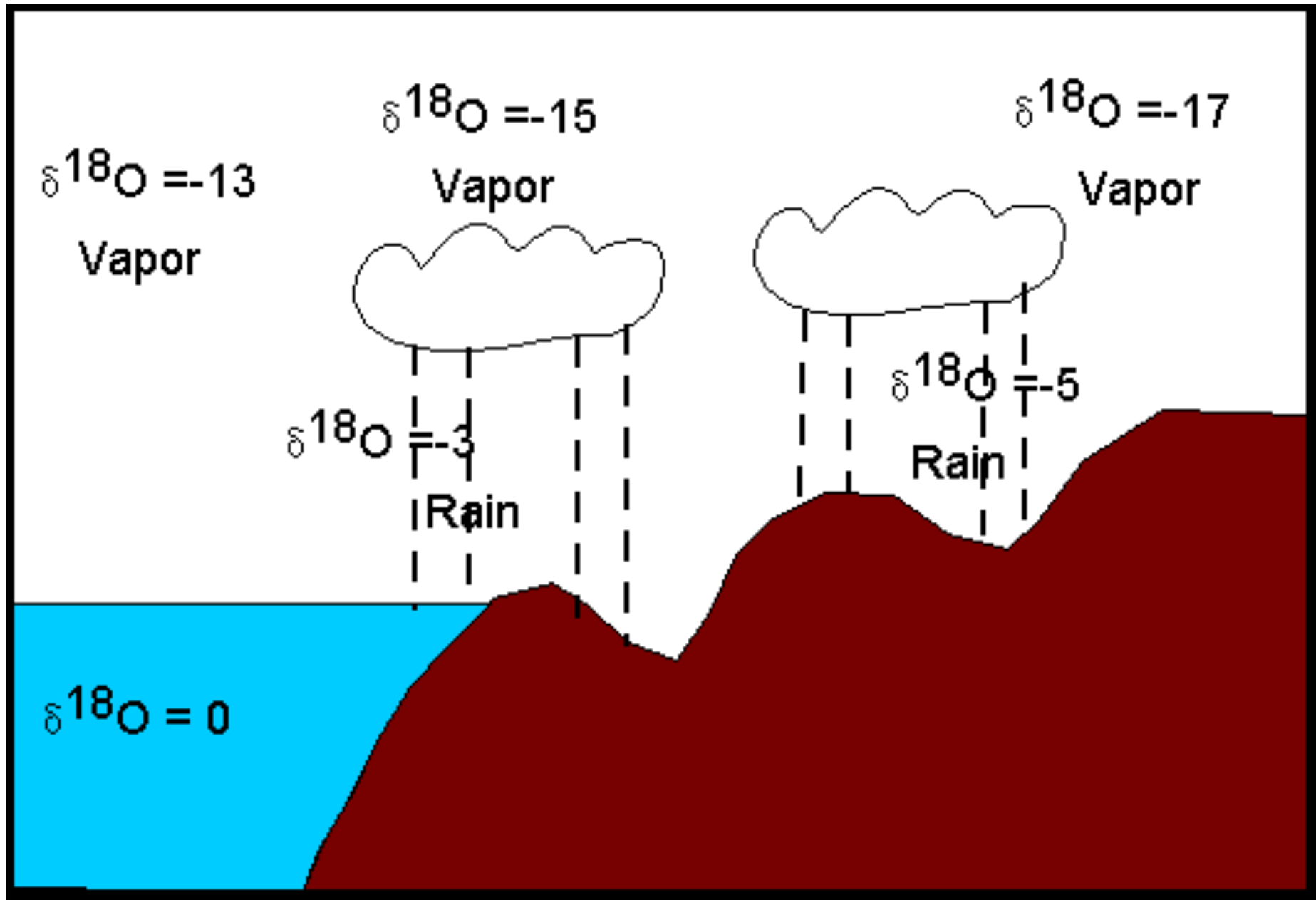
Standard Mean Ocean Water

(specially sealed reference seawater)

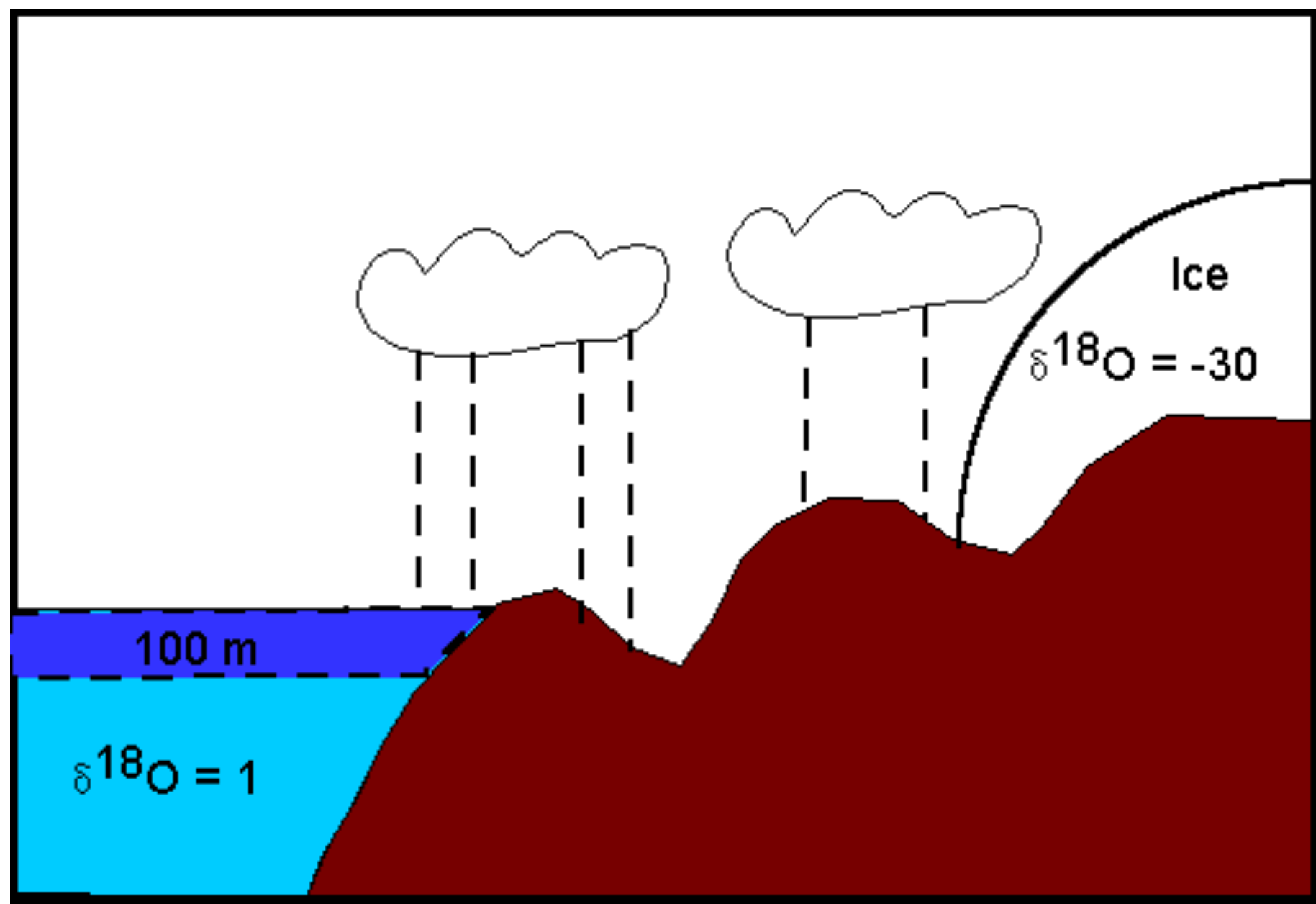
Les isotopes de l'oxygène dans le cycle de l'eau

- H_2^{16}O s'évapore de l'eau de mer plus rapidement que H_2^{18}O .
 - La vapeur d'eau, la pluie, et les glaces sont enrichies en ^{16}O .
 - En revanche, l'eau de mer s'enrichit en ^{18}O .
 - L'importance de cet effet augmente avec une diminution de la $T^\circ \text{C}$.

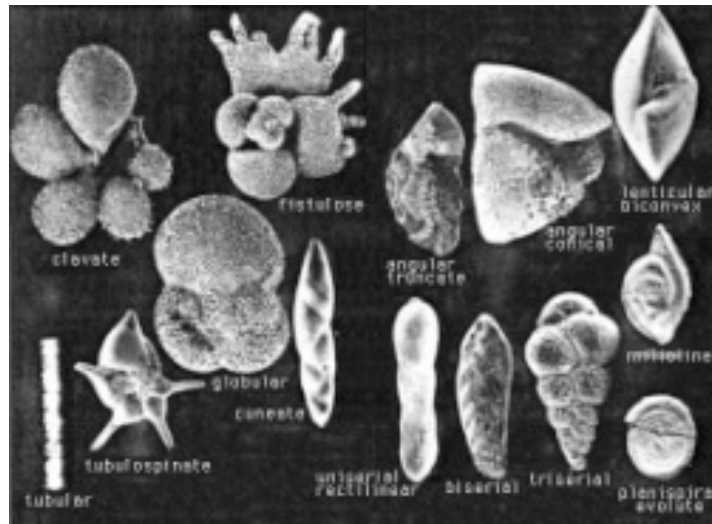




La Distillation de Rayleigh

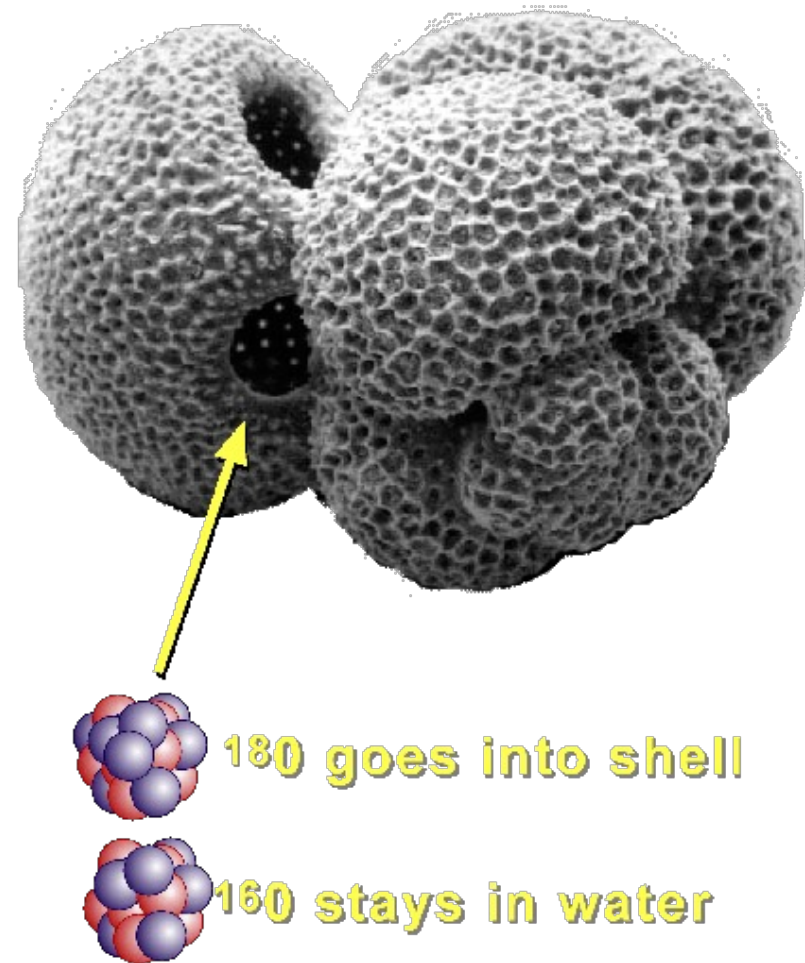


Les isotopes de l'oxygène dans les coquilles des foraminifères

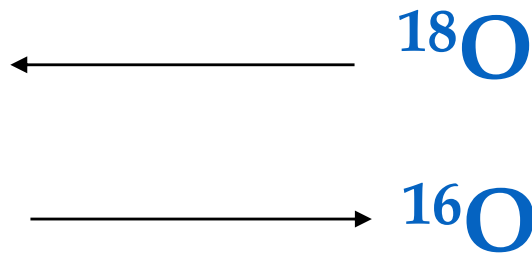
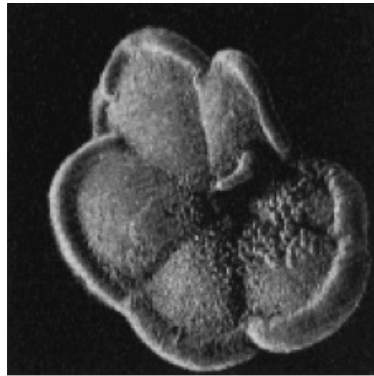


Les isotopes de l'oxygène dans les coquilles des foraminifères

- Quand les foraminifères construisent leurs tests de calcite (CaCO_3), ^{16}O est utilisé de préférence à ^{18}O .
- L'importance de cet effet dépend de la $T^\circ \text{ C}$



Effect de la Température sur le $\delta^{18}\text{O}$



Échange
isotopique avec
l'eau de mer

Quand la $T^{\circ}\text{C}$ diminue, plus
de ^{18}O est incorporé dans la
coquille du foraminifère.

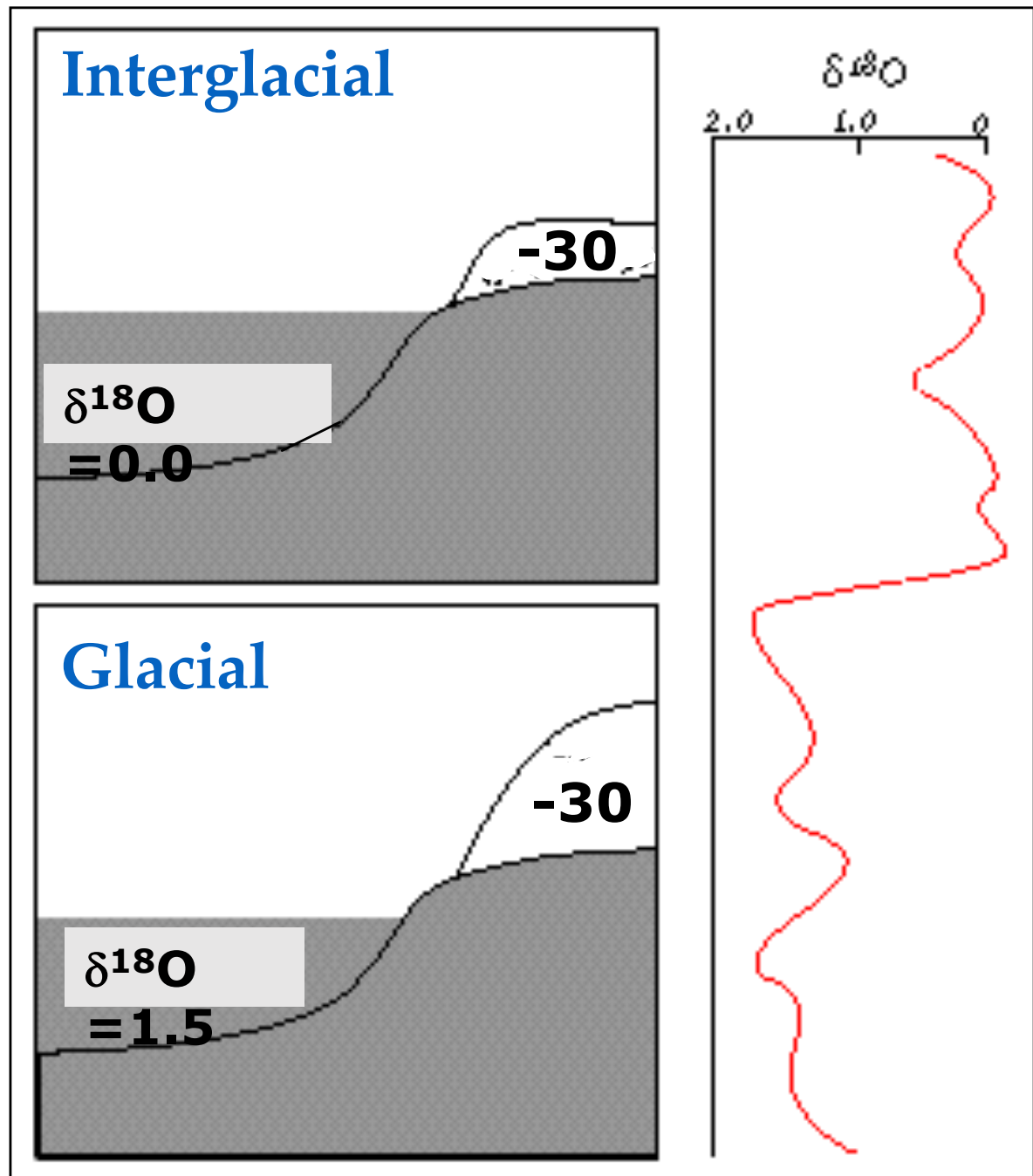
Effet de la temperature (experimentale):

$$T^{\circ} \text{ C} = 16.9 - 4.2 (\delta_{\text{calcite}} - \delta_{\text{eau}}) + 0.13 (\delta_{\text{calcite}} - \delta_{\text{eau}})^2$$



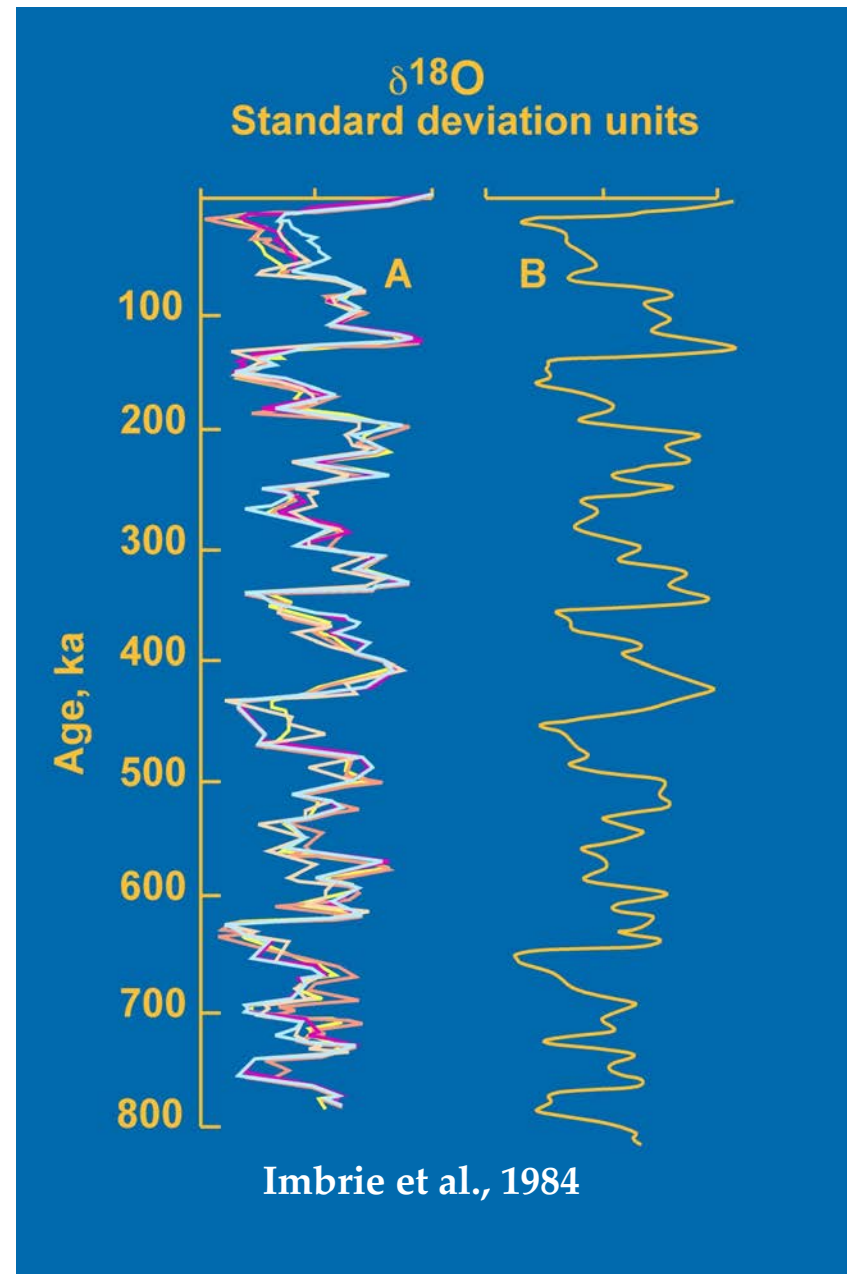
Calculer pour $T^{\circ}\text{C} = 0, 10$ et 20°C

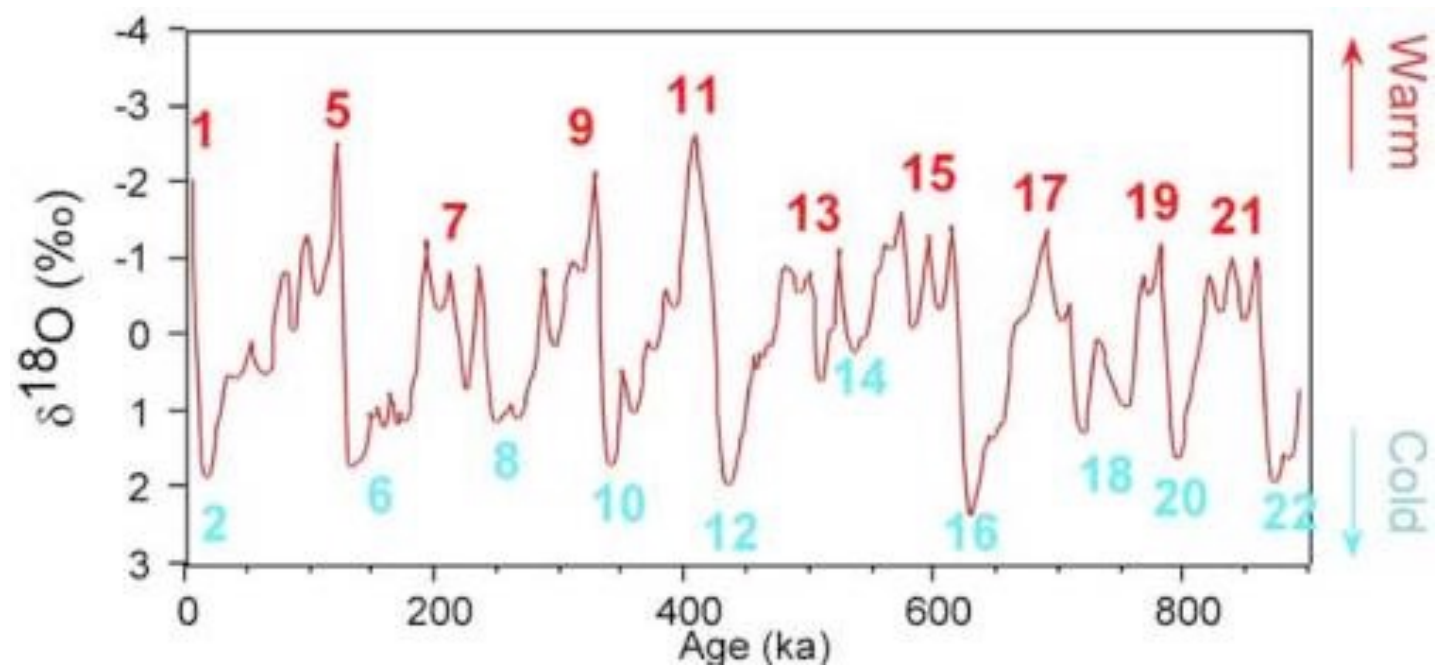
Variations de $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer au cours d'une alternance glaciaire / interglaciaire



Les Isotopes de l'oxygène dans les carottes de l'océan profond

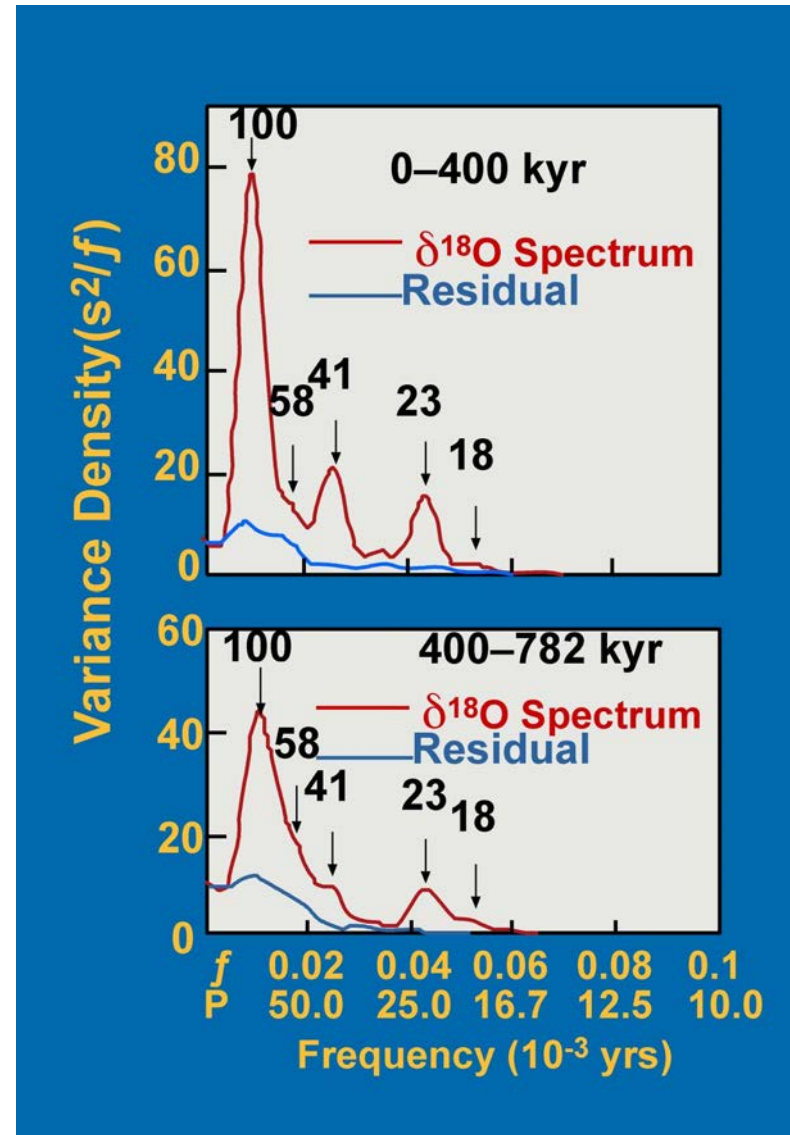
- En 1950, Emiliani analyse les rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des foraminifères de 15 carottes marines profondes
- Il découvre 15 périodes glaciaires (et non 4) et conclut qu'elles sont liées à un forçage orbital (*Milankovitch*).





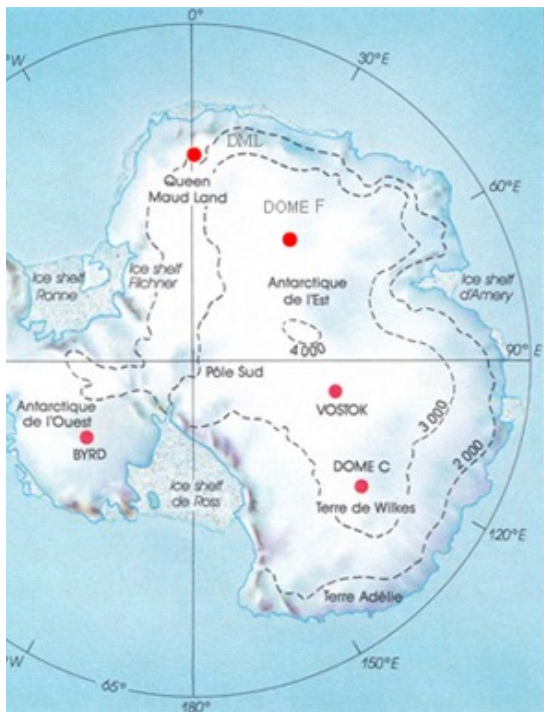
Les modèles de Hayes et Imbrie

- Dans les années 1970 - 1980, les données isotopiques de l'oxygène sur les foraminifères sont plus abondantes et d'une meilleure précision.
- John Hayes and John Imbrie démontrent clairement une corrélation entre la variation des enregistrements de l'O et les paramètres de Milankovitch.



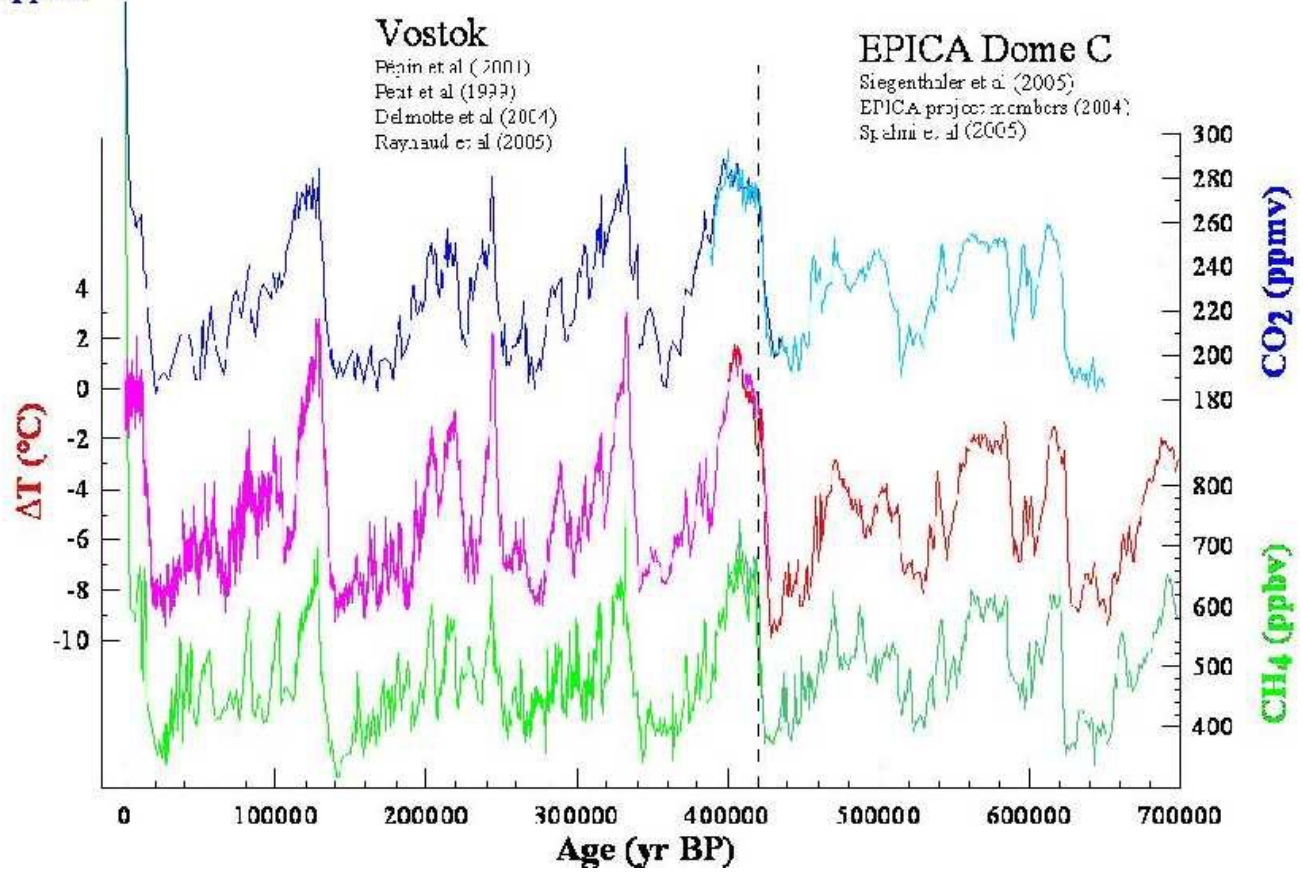
Exemples de feedbacks

- Albedo
 - **Les rayons solaires sont réfléchis par la neige et la glace. Retour dans l'espace de l'énergie solaire sans réchauffement de la surface terrestre. Plus les glaciers ont une extension importante, plus les rayons solaires sont réfléchis et moins la Terre peut se réchauffer.**
- CO₂ et CH₄
 - **A la fin du XIX^{ème} siècle, le chimiste Gustav Ahrenius démontre que le CO₂ de l'atmosphère peut aussi jouer un rôle par effet de serre en piégeant la chaleur. Si le CO₂ varie entre les périodes glaciaires et interglaciaires, il pourrait jouer un rôle amplificateur des variations de Milankovitch.**
- Changements dans la circulation océanique
 - **Les courants océaniques jouent un rôle majeur dans la redistribution de la chaleur à la surface de la terre. Si les courants apportent moins de chaleur à l'Atlantique Nord, il pourrait favoriser la croissance de la calotte de l'hémisphère Nord.**



1700 ppbv ★
 375 ppmv ★

Climat et gaz à effet de serre depuis 650 000 ans



Circulation océanique

