

## Corrigé

**1.1.**  $\delta^{18}\text{O} = \left( \frac{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{échantillon}}}{[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{standard-PBD}}} - 1 \right) \cdot 1000$  ; il s'agit de l'écart relatif de la qualité isotopique de l'échantillon par rapport à celle du standard, exprimé en pour mille.

**1.2.** Le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calc}}$  est fonction :

- de la « qualité isotopique de l'eau » d'une part ; les échanges isotopiques directs entre l'eau et la calcite lors de sa formation sont régis par la loi d'action de masse avec  $(\text{CaC}^{18}\text{O}_3)/(\text{CaC}^{16}\text{O}_3) = K \cdot [(\text{H}_2^{18}\text{O})/(\text{H}_2^{16}\text{O})]^3$  ; la calcite est donc d'autant plus riche en  $^{18}\text{O}$  que l'eau au sein de laquelle elle se forme l'est également ;
- du facteur « température de cristallisation » d'autre part ; en effet le coefficient  $K$  est inversement proportionnel à la température  $T$  ; l'échauffement favorise l'incorporation de  $^{16}\text{O}$  au détriment de  $^{18}\text{O}$  pour des questions de cinétique et conduit à la baisse du  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calc}}$ .

Au final,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{océan}} - \alpha \cdot T + \beta$ .

Les deux facteurs « qualité isotopique de l'eau » et « température » se conjuguent dans les faits ; ainsi, lors que la température décroît, l'isotope  $^{18}\text{O}$  est mieux piégé dans la calcite lors de sa cristallisation et, parallèlement, l'eau de mer s'enrichit en cet isotope par suite d'un accroissement du volume des calottes glaciaires séquestrant surtout  $^{16}\text{O}$ .

**1.3.** L'évolution globale des deux courbes est identique à savoir une hausse progressive du  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calc}}$  de  $-120$  à  $-20$  ka puis une baisse brutale entre  $-20$  ka et  $-5$  ka, déjà repérable avant  $-120$  ka.

La hausse du  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calc}}$  traduit un refroidissement et ceci suite à la conjugaison de l'effet « température » et de l'effet « qualité de l'eau » (voir 1.2.).

À l'inverse la baisse du  $\delta^{18}\text{O}_{\text{calc}}$  relève d'une hausse de la température et de la dilution de  $^{18}\text{O}$  de l'océan par l'eau de fonte des calottes glaciaires enrichies en  $^{16}\text{O}$  (le  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ocean}}$  diminue alors).

L'écart entre les 2 courbes provient des différences de température entre les eaux de surface chaudes (enregistrement par *G. ruber*) et les eaux de fond froides (enregistrement par *U. senticoso*) ;  $^{18}\text{O}$  est favorisé lors de la cristallisation dans ce dernier cas. On peut constater que cet écart est demeuré constant lors des changements climatiques.

**1.4.** L'expression de la température en fonction du rapport (Mg/Ca) conduit à la relation suivante :

$$T = 11,1 \cdot (\ln [\text{Mg}/\text{Ca}] - \ln [0,38]) + 3,4$$

Pour (Mg/Ca) = 3,  $T_{-125/130 \text{ ka}} = 26,3 \text{ }^\circ\text{C}$  et pour (Mg/Ca) = 2,  $T_{-25/30 \text{ ka}} = 21,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le refroidissement au long d'une phase glaciaire des eaux de surface du Pacifique Est-central est donc de  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1.5.** On peut avancer l'idée d'une modification récente de la profondeur de compensation des carbonates avec un relèvement de la lysocline de la calcite par exemple (autour de 3 000 m pour des dépôts à 2 800 m de fond ici) induisant une dissolution préférentielle de Mg par rapport à Ca.

**1.6.** On est en présence d'une seule signature cyclique majeure, de l'ordre de 110-115 ka environ (2 pics) ce qui correspond aux variations d'excentricité de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Cette signature est asymétrique avec une phase lente et graduelle de refroidissement suivie d'une phase brève et brutale de réchauffement.

**2.1.**

Courbe	Âge du changement majeur de régime	Signification climatique
A	$-22$ à $-20$ ka (*)	Hausse du $\delta^{18}\text{O}_{\text{glace}}$ donc réchauffement de l'atmosphère aux hautes latitudes
B	$-20$ à $-18$ ka	Réchauffement des eaux de surface du Pacifique Sud
C	$-18$ à $-16$ ka	Relèvement de la teneur en $\text{CO}_2$ de l'atmosphère donc accentuation de l'effet de serre, source de réchauffement
D	$-12$ à $-10$ ka	Baisse du $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$ donc apport notable d'eaux de fonte des calottes glaciaires (l'effet de réchauffement des eaux a été déduit) puisqu'il se répercute jusque dans le Pacifique central
E	$-24$ à $-22$ ka	Augmentation du flux solaire aux hautes latitudes donc accélération de la fonte estivale des glaces, échauffement de l'atmosphère et augmentation de l'émission d'infrarouges par la Terre

(\*) Le repérage de la période exacte de changement suppose de « lisser à la main » les deux portions de courbes de manière à éliminer les fluctuations de haute fréquence et à ne retenir que les variations de plus basse fréquence exprimant une tendance plus durable ; voir à titre d'exemple les traits en pointillés pour la courbe A sur la [figure 2](#).

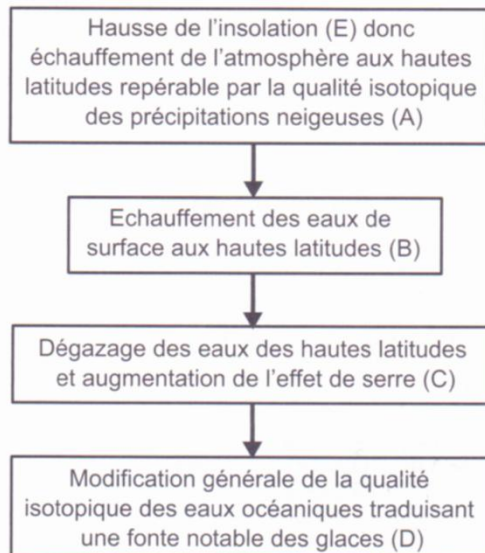
**2.2.** À partir de -24 voire -22 ka, le flux solaire incident augmente ce qui se traduit notamment aux hautes latitudes par un réchauffement prioritaire de l'atmosphère en raison de la faible capacité de chaleur spécifique de l'air et de sa faible densité ( $d_{\text{air}} = 0,0013$  à l'altitude zéro donc masses à réchauffer modestes).

Le réchauffement des eaux superficielles n'apparaît qu'à compter de -20 ka par suite l'inertie thermique de l'eau liquide (plus grande capacité de chaleur latente et densité près de 1 000 fois supérieure à celle de l'air).

Ce réchauffement des eaux se traduit par une moindre solubilité du  $\text{CO}_2$  dont le relargage dans l'atmosphère apparaît à partir de -18 ka et augmente donc l'effet de serre soit le réchauffement (auto-accelération ou boucle de rétroaction positive).

Ce n'est qu'à partir de -12 ka qu'est initiée une fonte notable des glaces capable de conduire via la circulation océanique globale à une dilution générale de  $^{18}\text{O}$  des océans (en fait, si l'on tient compte du délai de ce brassage océanique, de l'ordre de 1 à 2 ka, la fonte notable doit se produire entre -13 à -14 ka). Cette fonte généralisée suppose d'atteindre un échauffement critique soit des températures estivales largement positives en raison de la forte inertie thermique là encore (notable capacité de chaleur spécifique de la glace et surtout chaleur latente de fusion élevée).

La [figure 3](#) résume cette séquence d'évènements.



**Figure 3** Enchaînement des évènements lors d'une phase de réchauffement climatique (sortie de phase glaciaire).