
ÉPREUVE ÉCRITE DE GÉOLOGIE

ENS : PARIS – LYON – CACHAN

Durée : 4 heures

Coefficients : **PARIS option Biologie : 2** **option Sciences de la Terre : 5**
 LYON option Biologie : 4 **option Sciences de la Terre : 8**
 CACHAN : 2

MEMBRES DE JURYS : Pascal LECROART, Edouard KAMINSKI, Tristan FERROIR, Clément GANINO, Philippe SARDA, Gérard VIDAL

Les archives marines du climat de la Terre

Le sujet proposé cette année permettait de dégager quelques caractéristiques générales des variations du climat de la Terre. Il mettait l'accent sur la diversité des échelles de temps et des processus impliqués. Les échelles de temps caractéristiques s'échelonnaient en effet depuis l'année avec l'analyse de la composition en élément trace des coraux du dernier maximum glaciaire jusqu'à la dizaine de millions d'années avec la mise en place progressive du climat de la Terre que nous connaissons depuis 1 million d'années.

L'épreuve de sciences de la Terre du concours d'entrée aux Écoles normales supérieures a pour objectif l'évaluation des compétences portant (1) sur les connaissances des programmes de sciences de la Terre des classes préparatoires, (2) sur la capacité des candidats à mobiliser les connaissances des autres disciplines (mathématiques, physique et chimie, biologie) en relation avec le sujet de géologie, (3) sur leur esprit de synthèse et enfin (4) sur leur culture générale.

(1) Les questions de cours portaient sur des méthodes classiques de reconstitution des climats passés à partir d'archives diverses : utilisation de fossiles ou de traceurs géochimiques comme les éléments traces, le carbone 14 et les isotopes de l'oxygène. De manière générale, les copies mettent en évidence une connaissance et une présentation trop souvent superficielle de ces méthodes avec notamment l'absence de discussion sur les hypothèses d'application et sur les méthodes de mesure. Le jury déplore qu'une partie importante des candidats ne maîtrise pas ces fondamentaux de cours et rappelle que satisfaire à cette exigence est une condition essentielle à la réussite au concours. Par exemple, il est indispensable que les futurs candidats maîtrisent parfaitement bien l'utilisation du $\delta^{18}\text{O}$ comme marqueur paléoclimatique (définition, méthode de mesure, standard, origine des variations, unités en pour mille).

La question de cours portant sur les caractéristiques générales de la sédimentation a été dans l'ensemble insuffisamment développée par ignorance de ses principaux facteurs de contrôle. Il est rappelé que la production d'un schéma général obéit à des règles précises tant sur la forme (soin, légende) que sur le fond (contenu, adéquation aux attentes, réalisme), règles qui entrent en compte dans la notation.

Le couplage entre la géodynamique interne et le climat de la Terre tel qu'il est appréhendé dans la partie 3 a rarement été traité alors même que cet aspect du programme a fait déjà l'objet d'un sujet dans les années précédentes. Nous encourageons donc les futurs candidats à prendre en compte les commentaires des précédents rapports.

De manière générale, il semble que les candidats aient eu des difficultés à raisonner sur des données et des phénomènes naturels qui n'ont pas été explicitement traités en cours. Nous encourageons vivement les futurs candidats à approfondir leurs apprentissages en sciences de la Terre.

(2) Le jury constate cette année avec satisfaction la capacité de la grande majorité des candidats à décloisonner leurs connaissances en faisant appel aux autres disciplines du concours. Il en va ainsi des

mathématiques dans la partie 2. Par contre, peu de candidats attribuent le calcium et le strontium à la famille des alcalino-terreux. Nous encourageons donc les futurs candidats à poursuivre leur effort dans ce sens, en travaillant en particulier la chimie et la physique.

(3) L'esprit de synthèse constitue un critère essentiel de sélection à ce concours. La cinquième partie de ce devoir permettait par exemple d'évaluer cette capacité. Cette partie permettait de réinvestir les propres connaissances des candidats à la lumière des résultats obtenus dans le corps du sujet. Un nombre infime de candidats s'est lancé dans la structuration d'un tableau synthétique alors qu'il était à notre sens facile d'obtenir des points. Ceux qui ont traité cette partie n'ont que rarement utilisé leurs connaissances en plus des résultats obtenus dans les quatre premières parties du devoir. Nous incitons les futurs candidats à répartir équitablement leurs efforts dans les différentes parties en se fiant aux indications de temps et surtout à mettre en valeur leur esprit de synthèse en répondant à ce type de question.

(4) La culture générale des candidats était appréciée à travers l'attribution de points de bonus. De manière générale, le jury remarque un appauvrissement de celle-ci dans le domaine des sciences de la Terre. Par exemple, peu de candidats peuvent décrire sommairement le climat de la Terre au début de l'Ère Tertiaire comme un climat plus chaud qu'actuellement. Le jury encourage les futurs candidats à développer leur curiosité scientifique en relation avec les programmes du concours.

Le jury observe le développement de la stratégie du papillonnage. Les candidats vont à la pêche aux réponses jugées faciles sans prendre le temps d'entrer en détail dans la problématique des différentes parties. Nous regrettons cette stratégie dans la mesure où elle ne permet pas de dégager une vision d'ensemble des différentes parties mais le jury comprend qu'il puisse s'agir d'une conséquence de la forme de ce type d'épreuve. Nous rappelons que quelles que soient les circonstances les réponses aux questions doivent être argumentées et rédigées.

Concernant la forme, les copies sont dans leur immense majorité correctement rédigées. Nous déplorons l'absence de schémas explicatifs ou analytiques permettant d'illustrer une réponse. Il est clair que ce type de production est particulièrement bien évalué par les correcteurs.

Première partie : Les coraux, archives à haute résolution du climat de la Terre

1.1. Les facteurs de contrôle de la répartition des coraux récifaux sont : températures comprises entre 23°C et 33°C, eaux peu profondes (en moyenne dans les trente premiers mètres sous la surface de l'océan), eaux claires, à salinité normale et pauvres en éléments nutritifs.

1.2. a) Sr et Ca appartiennent à la famille des métaux alcalino-terreux localisée dans la deuxième colonne de la classification de Mendeleïev. En raison du même nombre d'électrons sur leur couche électronique périphérique, ils possèdent des propriétés communes. Le strontium possède un rayon et une masse atomique plus élevés que ceux du calcium.

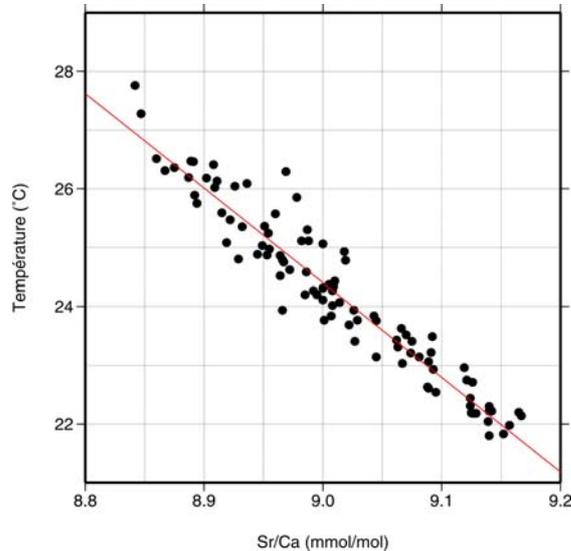
b) Calcite et aragonite sont des carbonates de calcium, la calcite est rhomboédrique, l'aragonite orthorhombique. Ces minéraux constituent les constituants majeurs de nombreuses coquilles d'invertébrés. L'aragonite n'étant pas stable dans les conditions de surface, elle se transforme souvent en calcite dans les roches sédimentaires.

Peu de candidats connaissent les différences qui existent entre aragonite et calcite.

1.3. a) La radiographie montre une alternance de bandes sombres et claires qui s'expliquent par les variations saisonnières de la croissance du corail en relation avec les changements des conditions de l'environnement dans lequel il vit (température de l'eau).

Les stries de croissance saisonnières des coraux sont rarement reconnues alors que ce type de processus est comparable à celui observé dans les troncs d'arbre. Les concentrations en strontium sont trop faibles pour induire une différence observable en radiographie comme cela a été proposé par de nombreux candidats.

- b) Le rapport Sr/Ca est inversement proportionnel à la température de l'eau de mer.
- c) Le strontium a des propriétés chimiques similaires à celles du calcium mais un rayon plus élevé. De volume supérieur donc, le Sr a intrinsèquement du mal à trouver des sites de taille appropriée dans le réseau cristallin de l'aragonite. Si la température augmente, l'agitation thermique gêne encore plus cette substitution du Ca par le Sr. La dépendance de cette substitution en fonction de la température obéit à une loi de type Arrhenius qui est approchée par une relation linéaire dans notre cas en raison de la faiblesse des variations de température observées.
- d)



Le jury attire l'attention sur le fait que lorsqu'il est demandé la réalisation d'un graphique, la production du résultat d'une régression linéaire n'est pas suffisante. Il était attendu ici le graphique, et si le candidat souhaitait mettre en œuvre une méthode de régression plus robuste que la méthode graphique, il pouvait alors le faire.

Dans le cas présent, la variation de température étant très faible, la relation peut être approchée par une relation linéaire d'équation :

$$T (^{\circ}\text{C}) = -16,1 \text{ Sr/Ca (mmol/mol)} + 169,3$$

$$\text{ou Sr/Ca (mmol/mol)} = -0,05 T (^{\circ}\text{C}) + 10$$

1.4. a) Les coraux sont datés par la méthode radiochronologique basée sur le ^{14}C .

Attention, l'utilisation du strontium comme traceur des paléotempératures n'implique pas l'utilisation de la méthode Rb/Sr pour la datation des coraux. La période d'investigation est ici incompatible avec cette méthode.

b) Principe de la datation au ^{14}C : Le ^{14}C est incorporé dans la partie vivante du corail. Au cours de la croissance, les parties anciennes du support calcaire construit par le corail sont progressivement abandonnées par la partie vivante qui est construite par-dessus. Ainsi isolée, cette partie ancienne voit sa concentration en ^{14}C décroître par désintégration radioactive selon une période de demi-vie de 5730 ans. Cette méthode ne s'applique que sur des échantillons âgés de moins de 60000 ans et seulement si le système a évolué de manière fermée. Le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ est mesuré par un spectromètre de masse qui permet de séparer les isotopes d'un même élément selon leur masse grâce à l'action d'un champ magnétique.

1.5. a) À partir de la valeur moyenne du rapport Sr/Ca (9,06 mmol/mol), la relation précédente donne une température moyenne pour 21000 ans de 23,4 °C soit 0,85°C de moins que la valeur moyenne actuelle dans cette région (Figure I.3).

b) Les valeurs de Sr/Ca oscillent entre 9,3 et 8,8 mmol/mol soit une température comprise entre 27,1°C et 18,6°C (8,5°C d'amplitude).

c) L'amplitude des températures actuelles dans cette région est de 6°C. La période de 21000 ans se situe pendant le dernier maximum glaciaire (DMG). À cette période et sur cette région, on observe donc une très faible diminution des températures moyennes des eaux de surface. Par contre, on observe une augmentation de l'amplitude des variations saisonnières de température.

d) Les observations géologiques à mentionner sont par exemple la présence de moraines glaciaires dans les plaines, de dépôts périglaciaires de type loess, de représentation d'animaux polaires dans les grottes ornées.

Peu de candidats ont mentionné que cette période correspondait au dernier maximum glaciaire. Les candidats connaissent un certain nombre d'outils permettant de reconstruire les paléoclimats mais peu pensent à donner les caractéristiques propres de cette période alors que les observations géologiques sont nombreuses.

e) La baisse des températures enregistrée par les coraux est sans commune mesure avec celle observée à nos latitudes, qui est beaucoup plus importante.

f) La bande équatoriale ne montre pas de changement significatif de température. Par contre, on peut prédire que l'extension latitudinale des coraux a été réduite pendant le DMG.

La réponse à cette question ne pouvait se concevoir que si le candidat avait parfaitement identifié le DMG ce qui a été rarement le cas. Nous déplorons un manque de recul sur les grandes variations climatiques et leur échelle de temps associée.

1.6. Les intérêts :

- forte sensibilité du rapport Sr/Ca à la température : caractérisation à haute résolution des variations de température des eaux de surface (signal saisonnier et pluriannuel)
- pas de remaniement sédimentaire (bioturbation)

Les limites :

- durée de vie limitée
- très forte sensibilité aux conditions environnementales
- le rapport Sr/Ca est modifié en cas d'altération
- conditions de vie limitées aux régions ayant une faible amplitude des variations climatiques.

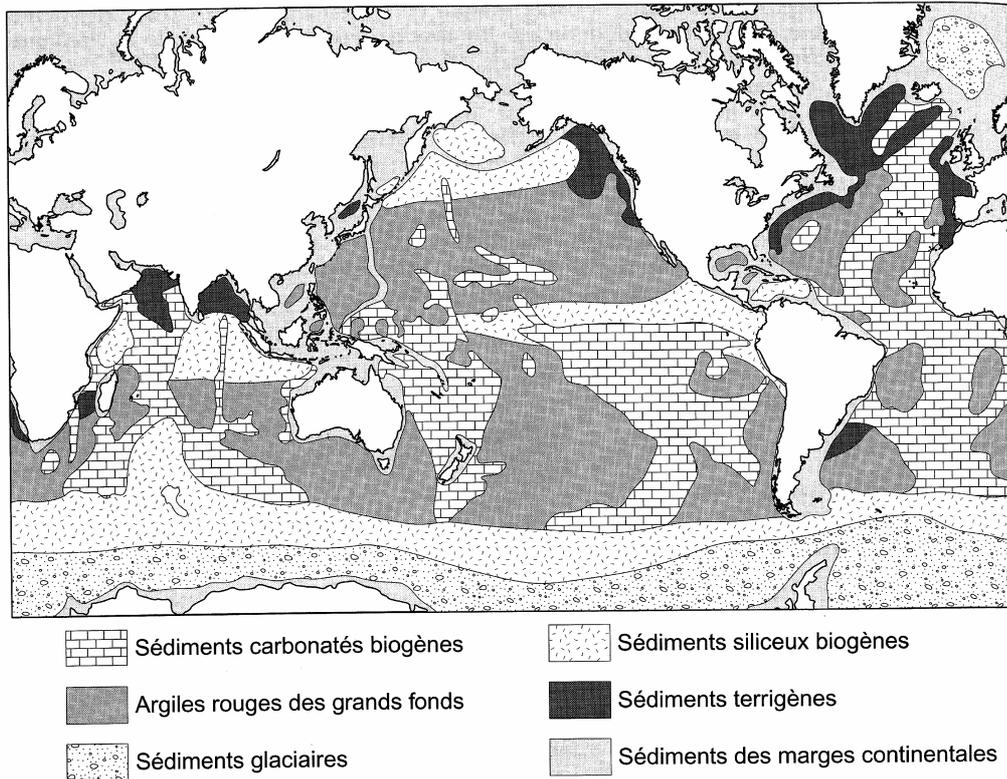
Deuxième partie : Bioturbation et archivage sédimentaire

2.1. La sédimentation actuelle dans les océans présente plusieurs caractéristiques liées à ses constituants. On distingue :

- les sédiments de marges : sédiments essentiellement détritiques en provenance des continents associés à un apport biogénique carbonaté
- les sédiments carbonatés biogènes : sédiments riches en tests de Foraminifères et de Coccolithophoridés
- les sédiments siliceux biogènes : sédiments riches en tests de Radiolaires et de Diatomées.
- les sédiments terrigènes profonds : sédiments détritiques associés au fonctionnement de cônes détritiques profonds, transport de sédiments fins par les canyons jusqu'à la base de la marge.
- les sédiments glaciaires : sédiments provenant de la fonte d'icebergs et du transport par les glaciers.
- les argiles rouges des grands fonds : sédiments argileux très fins résiduels, les sédiments carbonatés et siliceux ne parviennent pas à ces profondeurs (dissolution).

La carte de répartition des sédiments était demandée mais fut peu produite. Elle met en évidence une répartition qui tient compte de la proximité des continents, de la profondeur du plancher océanique en relation avec la profondeur de compensation des carbonates, de la productivité primaire et de l'hydrologie des océans (upwellings par exemple).

Les membres du jury ont été marqués par le manque de connaissances géologiques sur la sédimentation. Les caractéristiques générales de la sédimentation océanique actuelle ne sont pas assez maîtrisées. Une synthèse à partir de la carte ci-dessous permettait de répondre à la question.



Carte de répartition des principaux types de sédiments dans l'océan actuel (d'après Cojan et Renard, *Sédimentologie*, Dunod, 2006)

2.2. a) Sans bioturbation, le traceur se situerait à 15 cm après 150 ans.

b) Les modifications induites par la bioturbation sont les suivantes : (1) Le traceur est réparti sur une épaisseur plus importante que dans sa répartition initiale. La concentration maximale est corrélativement plus faible. La bioturbation lisse donc le signal. (2) Le pic de concentration maximale est d'autant plus profond que la bioturbation est importante. La bioturbation accélère donc l'enfouissement du traceur. (3) Dans les cas b, c et d, le traceur est encore présent dans la couche bioturbée 150 ans après son dépôt. La bioturbation retient donc plus longtemps le traceur dans la zone bioturbée.

L'analyse de la figure se limite souvent à mentionner le décalage du signal vers le bas. D'autres perturbations sont visibles. Peu de candidats remarquent à juste titre que la bioturbation retient également le traceur dans la couche superficielle.

2.3.1. a) L'équation (1) est une équation différentielle ordinaire du second ordre à coefficients constants qui admet comme solution générale l'équation suivante :

$$A(x) = A_1 \exp(\alpha x) + A_2 \exp(\beta x)$$

En dérivant $A(x)$ deux fois et en remplaçant sa dérivée première et seconde dans l'équation (1), on trouve une équation devant s'annuler quel que soit x . Cela n'est possible que si α et β sont les solutions de l'équation du second degré suivante :

$$Db\gamma^2 - \omega\gamma - \lambda = 0$$

$$\text{On trouve alors } \alpha = \left(\omega - \sqrt{\omega^2 + 4Db\lambda} \right) / 2Db < 0 \text{ et } \beta = \left(\omega + \sqrt{\omega^2 + 4Db\lambda} \right) / 2Db > 0$$

b) α est négatif et β positif (en le justifiant).

c) En tenant compte des conditions aux limites, on trouve $A_1 = A_0$ et $A_2 = 0$.

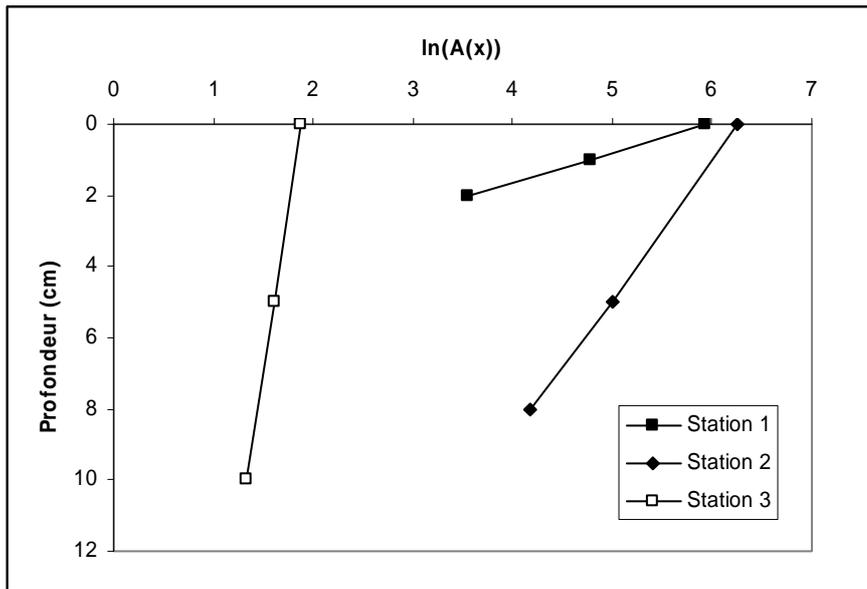
d) L'activité du radioisotope dans la couche bioturbée obéit donc à la relation suivante :

$$A(x) = A_0 \exp\left(\frac{\omega - \sqrt{\omega^2 + 4Db\lambda}}{2Db} x\right)$$

$$\ln A(x) - \ln A_0 = \frac{\omega - \sqrt{\omega^2 + 4Db\lambda}}{2Db} x$$

2.3.2.

a)



b) Pour chaque station, les points sont alignés.

c) La pente p de cette droite vaut selon la réponse précédente :

$$p = \frac{\ln(A(x)) - \ln(A_0)}{x} = \frac{\omega - \sqrt{\omega^2 + 4Db\lambda}}{2Db} \text{ ce qui donne } Db = \frac{\lambda}{p^2} + \frac{\omega}{p}$$

d) A partir des données d'activité, on obtient les coefficients de bioturbation suivants pour les trois stations :

Station	1	2	3
Db (cm ² /an)	0,02	0,33	3,15

Le coefficient de bioturbation décroît avec la bathymétrie.

2.4. a) La sédimentation favorise la préservation des variations des traceurs climatiques en raccourcissant leur temps de transit dans la couche bioturbée et donc en diminuant l'effet perturbateur de celle-ci.

b) La compilation proposée montre que Db et ω décroissent significativement quand la profondeur d'eau augmente. Prenons les trois cas demandés :

- cas 1 (plateau continental) : $z = 100$ m, $Db = 20$ cm²/an, $\omega = 0.2$ cm/an, $Pe = 0.1$
- cas 2 (pente continentale) : $z = 2000$ m, $Db = 1$ cm²/an, $\omega = 0.01$ cm/an, $Pe = 0.1$
- cas 3 (plaine abyssale) : $z = 5000$ m, $Db = 0.1$ cm²/an, $\omega = 0.001$ cm/an, $Pe = 0.1$

c) De manière générale, la bioturbation domine la sédimentation. La bioturbation est donc un processus affectant significativement l'archivage sédimentaire des traceurs climatiques. La dispersion des paramètres de la figure 2.2 permet d'imaginer des environnements particuliers où la bioturbation ne domine pas l'enfouissement.

2.5. Les résultats précédents établissent que la préservation des signaux est favorisée dans les environnements sédimentaires peu bioturbés. La préservation des variations des traceurs climatiques sera favorisée dans le cas d'un taux d'enfouissement élevé par rapport à la normale (marge grasse par exemple), ou dans le cas d'une activité biologique très faible. Les environnements actuels ou passés caractérisés par une faible teneur en matière organique ou en oxygène constituent des environnements propices à l'archivage des variations des traceurs climatiques (environnements anoxiques, zone à oxygène minimum par exemple).

Troisième partie : Des archives marines de l'évolution du climat de la Terre depuis 65 millions d'années

3.1. Preuves paléontologiques : présence de fossiles de faunes des mers chaudes à plus haute latitude qu'actuellement (récifs coralliens, Crocodiles), présence de fossiles de feuilles de Palmier de l'Eocène à des

latitudes où ces plantes ne peuvent pas vivre actuellement. Preuves sédimentologiques : absence de sédiments glaciaires ...

3.2.

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

Le standard est ici le rostre de Bélemnite de la formation Pee Dee.

b) Le rapport isotopique est mesuré par spectrométrie de masse dont le principe repose sur la séparation des isotopes en fonction de leur masse par l'action d'un champ électrique puis d'un champ magnétique.

Nous déplorons fortement la proportion importante de candidats ne connaissant pas la définition précise du $\delta^{18}O$.

Les spectromètres de masse sont capables aujourd'hui de mesurer ces rapports avec une très grande précision.

c) Les isotopes de l'oxygène sont fractionnés au cours de la formation du test des Foraminifères. Ce fractionnement dépend principalement (1) de la température et (2) du rapport isotopique de l'eau de mer dans laquelle vit l'organisme. Ce dernier dépend essentiellement du volume des glaces piégées aux pôles. Ainsi $\delta^{18}O_c$ augmente lorsque la température diminue et/ou lorsque le volume des glaces piégées dans les calottes augmente.

Trop de candidats ne maîtrisent pas l'origine des variations du $\delta^{18}O_c$ qui constitue un paramètre fondamental permettant de comprendre le climat passé de la Terre. Ce constat est d'autant plus surprenant que la partie suivante proposait une formule permettant de déterminer cette dépendance.

3.3. a) Entre 52 et 38 Ma, on suppose que $\delta^{18}O_w$ est constant.

$$\Delta T = T(52\text{Ma}) - T(38\text{Ma}) = -4,2 \cdot \Delta \delta^{18}O_c = -4,2 \cdot -1,5 = 6,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La température moyenne des eaux de fond s'est refroidie de 6°C en 14 Ma.

b) L'hypothèse est raisonnable puisque la Terre ne présentait pas de calotte glaciaire continentale (Figure 3.1).

c) Entre 38 Ma et l'actuel, $\Delta \delta^{18}O_w = ^{18}O_w(0\text{Ma}) - ^{18}O_w(38\text{Ma}) = +1 \text{ } \text{‰}$.

$$\Delta T = T(38\text{Ma}) - T(0\text{Ma}) = -4,2 \cdot (\delta^{18}O_c(38 \text{ Ma}) - \delta^{18}O_c(0\text{Ma}) - ^{18}O_w(38\text{Ma}) + ^{18}O_w(0\text{Ma})) = -4,2 \cdot (-2,75 + 1) = 7,35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La température moyenne des eaux de fond s'est de nouveau refroidie de plus de 7°C en 38 Ma.

d) Au total, les eaux de fond se sont refroidies de 13°C depuis 52 Ma.

Les eaux de fond sont passées de 15°C à 2°C en 52 Ma. Le refroidissement des eaux de fond est lié à la mise en place de la circulation thermohaline qui amène en profondeur des eaux de surface des hautes latitudes. Une partie du refroidissement observé est associée au refroidissement des eaux de surface en relation avec le refroidissement du climat de la Terre.

La transformation profonde du climat de la Terre depuis le début de l'Ère Tertiaire a rarement été analysée. Peu de candidats ont compris qu'il s'agissait d'un refroidissement majeur. La mise en place de la circulation thermohaline a joué un rôle majeur dans cette évolution.

3.4. Les processus permettant d'expliquer le refroidissement du climat de la Terre depuis le début du Tertiaire sont :

- ouverture de passages océaniques : ouverture de l'Atlantique nord (communication entre l'océan Atlantique et l'océan Arctique), passage du Drake, passage entre la Tasmanie et l'Antarctique. Les deux derniers participent à l'isolement de l'Antarctique favorisant probablement le développement de la calotte antarctique.

- fermeture de passages océaniques : la formation de l'isthme de Panama isole l'Atlantique du Pacifique entraînant une réorganisation des circulations océaniques avec pour conséquence le développement des calottes continentales de l'hémisphère nord et la mise en place de la circulation thermohaline.

- volcanisme et orogénèse : à long terme (plusieurs dizaine de Ma), la mise en place de certains silicates et leur altération accélère le piégeage de CO₂ atmosphérique et entraîne un refroidissement du climat.

La figure 3-1 montre clairement que la relation entre un processus et la variation du climat de la Terre n'est pas directe, plusieurs processus interviennent et interagissent entre eux.

La relation entre le climat et la tectonique des plaques est un sujet à travailler plus en profondeur.

3.5. La courbe présente une tendance générale marquant une augmentation du $\delta^{18}O_c$ en relation avec le refroidissement des eaux de fond et avec la formation des calottes de l'hémisphère nord. A cette tendance, s'ajoutent des oscillations régulières.

a) Entre 2,75 et 0,6 Ma, le signal oscille selon une période proche de 41000 ans (une barre d'erreur large est acceptée). La durée des périodes froides est comparable à celle des périodes plus chaudes.

b) À partir de 0,6 Ma, les oscillations sont dominées par un cycle de 100000 ans avec des périodes glaciaires dominant les périodes interglaciaires. Le signal à cette échelle de temps dépend directement des variations de l'insolation de la Terre en relation avec les oscillations de son orbite (théorie de Milankovitch). 41000 ans et 100000 ans correspondent respectivement à la période d'oscillation de l'obliquité et de l'excentricité de l'orbite de la Terre.

Quatrième partie : Archives climatiques marines et peuplement humain de l'Europe occidentale

4.1. a) Les carottes sont prélevées près des côtes. Les pollens sont transportés par les vents des zones continentales vers l'océan où ils sédimentent ensuite.

b) Pendant l'épisode H4, le diagramme pollinique correspondant à l'évolution de la flore du sud-ouest de l'Espagne montre le développement d'une végétation de type semi-désertique au détriment de la forêt méditerranéenne. Par contre, le diagramme pollinique du Nord-ouest de l'Espagne accuse une légère diminution des espèces arbustives (Pin surtout) au profit des espèces herbacées. Aucune espèce aride n'est présente dans cette région pendant l'épisode H4.

c) Les températures de surface de l'océan sont obtenues par comparaison des assemblages faunistiques planctoniques présents dans chaque niveau de la carotte avec les assemblages actuels pour lesquels les températures des eaux de surface sont parfaitement connues.

Beaucoup de candidats mentionnent la mesure du $\delta^{18}O_c$ des Foraminifères planctoniques pour appréhender la température des eaux de surface. Ils oublient de mentionner que cette méthode à elle seule ne permet pas d'aboutir en raison de la dépendance de ce paramètre aux variations du $\delta^{18}O_w$ de l'eau de mer (partie 3 question 3).

d) Les courbes montrent un refroidissement des eaux de surface de 4°C et de 10°C respectivement pour les carottes MD95-2042 et MD95-2331 pendant l'épisode H4.

e) L'épisode H4 se traduit par un refroidissement et une aridité sensible du climat de l'Espagne et de manière générale de l'Ouest de l'Europe.

4.2. Avant l'épisode H4, l'Espagne présentait un gradient de précipitations décroissant depuis le Nord-ouest (> 800 mm/an) jusqu'au Sud-est (< 100 mm/an). La première région présentait un climat tempéré contre un climat de type Méditerranéen pour la région Sud-ouest. Les dépressions en provenance de l'océan Atlantique alimentaient préférentiellement la partie Nord-ouest de l'Espagne. Pendant l'épisode H4, les précipitations diminuent drastiquement entraînant le développement d'une zone aride dans le sud de l'Espagne. La température moyenne montre un léger refroidissement localisé surtout dans la région Nord-ouest. Les masses d'air en provenance de l'océan Atlantique deviennent plus sèches et plus froides. L'aridité du climat de l'Espagne entraîne le développement d'une végétation semi-désertique au Sud-ouest et la régression de la forêt tempéré au profit d'une végétation herbacée au Nord-ouest de l'Espagne.

4.3. L'hypothèse proposée fait la relation entre l'installation de l'Homme moderne et l'aridité du climat de l'Espagne. Pendant l'épisode H4, le nouveau climat semi-désertique du Sud de l'Espagne empêche la migration de l'Homme moderne vers le Sud où il ne trouve pas les conditions favorables à sa survie (absence de proies classiquement chassées). Cette région offrirait ainsi une zone refuge à l'Homme de Néanderthal qui y aurait trouvé des conditions favorables de survie. Au nord de l'Espagne, le climat n'est pas aride et l'Homme moderne a pu s'installer.

4.4. Avant l'épisode H4, le sédiment est constitué majoritairement de tests de Foraminifères planctoniques (unicellulaire à test carbonaté). Pendant l'épisode H4, on observe la présence en abondance de minéraux silicatés (quartz essentiellement d'origine continentale).

Nous encourageons vivement les candidats à apprendre à reconnaître un test de Foraminifère et un grain de quartz.

4.5. L'épaisseur du niveau H4 est un indicateur potentiel de la source des sédiments IRD. L'épaisseur des niveaux à IRD augmente en direction du secteur nord-ouest de l'océan Atlantique Nord. Entre 40000 et 38000 ans, la région nord-ouest de l'Atlantique était bordée par d'immenses calottes glaciaires dont les glaces peuvent charrier des sédiments du même type que ceux observés dans les niveaux H4. Les IRD sont des fragments de roches arrachés au socle continental par les glaciers. Ces éléments sont ensuite transportés par les icebergs lors d'épisodes catastrophiques de fonte. Les icebergs proviendraient de la partie nord-ouest de l'Atlantique.

À partir de l'utilisation d'autres traceurs, il a été montré que les icebergs porteurs des IRD de l'épisode H4 provenaient des calottes du Groenland et du Canada. IRD et H4 signifient respectivement Ice-Rafted Detritus et événement d'Heinrich n°4.

4.6. a) Dans la grande majorité des carottes, l'épisode H4 s'accompagne d'une diminution du $\delta^{18}\text{O}$ des Foraminifères planctoniques.

b) Cette variation augmente lorsque l'on se dirige vers le Nord-Ouest ce qui confirme l'origine établie précédemment.

c) $\delta^{18}\text{O}$ dépend des caractéristiques de l'eau de surface dans laquelle vivent ces organismes. La diminution du $\delta^{18}\text{O}$ peut s'expliquer par la diminution du $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau de mer ou par l'augmentation de la température ambiante (cf. partie 3).

4.7. a) L'apport massif d'eau douce peut résulter de la fonte massive des icebergs qui sont pauvres en ^{18}O .

b) Les tests réalisés montrent que l'indice de similarité dépasse la valeur critique de 0,7 pour une durée de l'épisode H4 inférieure à 250 ans et pour une décharge d'eau douce comprise entre 0,26 et 0,32 millions de m^3 par seconde. L'hypothèse testée rend compte de l'évolution du $\delta^{18}\text{O}$.

c) Le modèle prédit alors une durée moyenne de l'épisode H4 de 175 ans pour une décharge d'eau douce moyenne de 0,29 millions de m^3 par seconde. d) L'épisode H4 constitue donc un événement climatique très bref.

4.8.

a) Q = quantité d'eau douce injectée sur l'ensemble de l'épisode H4 :

$$Q = 0,29 \cdot 10^3 \text{ km}^3 \times (365 \times 24 \times 3600 \text{ an}^{-1}) \times 175 \text{ ans} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ km}^3.$$

S = surface des océans :

$$S = 1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3 / 3,7 \text{ km} = 3,6 \cdot 10^8 \text{ km}^2.$$

H = élévation du niveau des mers pendant l'épisode H4 (en supposant constante la surface des océans) :

$$H = 1,3 \cdot 10^6 \text{ km}^3 / 0,36 \cdot 10^9 \text{ km}^2 = 3,8 \text{ m}.$$

b) La vitesse moyenne de remontée du niveau de la mer est de 1,5 cm/an.

c) La vitesse actuelle d'élévation du niveau de la mer est de 2 mm/an et résulte majoritairement de la dilatation de l'océan de surface en réponse au réchauffement climatique.

4.9. L'hypothèse retenue est la suivante : L'Homme moderne migre vers l'Europe de l'ouest un peu avant l'épisode H4. Il progresse vers l'Espagne mais ne pénètre pas dans le sud de l'Espagne pendant l'épisode H4. Cette région offre ainsi une zone refuge à l'Homme de Néanderthal. Les conditions climatiques de l'épisode H4 ont été reconstituées : l'épisode H4 est caractérisé par un refroidissement général du climat de l'Europe de l'ouest et une évolution de la végétation vers une végétation de milieu aride (Figures 4.1 et 4.2) en relation avec la libération d'une quantité importante d'eau douce associée à la déstabilisation de calottes glaciaires présentes au Groenland et au Canada (Figures 4.3 à 4.6). La connexion entre les deux processus ferait intervenir le couplage étroit qui existe entre les circulations océanique et atmosphérique dans l'Atlantique nord. La libération d'eau douce a pu limiter la circulation thermohaline et le courant du Gulf Stream refroidissant corrélativement le climat de la partie ouest de l'Europe et accentuant l'aridité du climat du sud de l'Espagne. Cette aridité pendant l'épisode H4 n'offrirait pas de condition adéquate pour le développement de l'Homme moderne. L'Homme de Néanderthal aurait pour sa part disposé des capacités nécessaires à sa survie dans ces conditions. La fin de l'épisode H4 a sonné le glas de cette population sur l'ensemble de l'Espagne.

Cinquième partie : Synthèse

Evolution du climat	Echelle de temps (an)	Exemples d'archives	Caractéristiques	Origines possibles	Partie du devoir
<i>A long terme</i>	$10^5 - 10^8$	Fossiles (Foraminifères), formations sédimentaires	Évolution graduelle	Tectonique des plaques Altération des silicates Volcanisme	3
<i>A moyen terme</i>	$10^4 - 10^6$	Glaces Fossiles (Foraminifères, coraux, pollens)	Évolution cyclique	Oscillations de l'orbite terrestre (Milankovitch)	3
<i>A court terme</i>	$10^2 - 10^4$	Glaces Fossiles (Foraminifères, coraux, pollens)	Évolution abrupte	Interne au système climatique. Instabilité des calottes glaciaires	4
<i>A très court terme</i>	$< 10^2$	Glaces Fossiles (coraux), Spéléothèmes, Cernes des arbres	Évolution saisonnière ou pluri-annuelle	Rotation de la Terre CO ₂ anthropique Instabilité du système climatique (El Niño)	1

Cette dernière partie est de loin la plus éludée par les candidats alors qu'elle devait s'alimenter des réponses aux questions précédentes et de leurs connaissances. Les membres du jury conseillent vivement aux futurs candidats de développer leurs capacités à synthétiser leurs connaissances sous forme de tableaux ou de schémas.

Références et remerciements :

Première partie :

Nous remercions chaleureusement Thierry Corrège, Professeur de Paléoclimatologie au laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1 pour les données de température et de rapport Sr/Ca.

- Beck, J. W., Edwards, R. L., Ito, E., Taylor, F. W., Recy, J., Rougerie, F., Joannot, P., and Henin, C., 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal Strontium/Calcium ratios. *Science* **247**, 644-647,
 Camoin, G. and Montaggioni, L., 1995. Coraux fossiles, archives du climat. *La Recherche* **275**, 402-407,
 Corrège, T., 2006. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology* **232**, 408-428,
 Montaggioni, L., 2007. *Coraux et récifs*. *Archives du climat*. Vuibert.

Deuxième partie :

Lecroart, P., Schmidt, S., Anschutz, P., and Jouanneau, J. M., 2007. Modeling sensitivity of biodiffusion coefficient to seasonal bioturbation. *J. Mar. Res.* **65**, 417-440.

Troisième partie :

- Lisiecki, L. and Raymo, M., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* **20**, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
 Ruddiman, W. F., 2000. *Earth's climate: past and future*. Freeman, W. H. and Co. 465 pages.
 Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., and Billups, K., 2001. Trends, rythms and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* **292**, 686-693,

Quatrième partie :

Maria Sanchez Goñi, directrice de Recherche EPHE au laboratoire EPOC de l'Université Bordeaux 1 est chaleureusement remerciée pour les données de diagrammes polliniques et de courbes de variation des paramètres des carottes.

- Cortijo, E., Labeyrie, L., Vidal, L., Vautravers, M., Chapman, M., Duplessy, J.-C., Elliot, M., Arnold, M., Turon, J.-L., and Auffret, G., 1997. Changes in the sea surface hydrology associated with Heinrich event 4 in the North Atlantic Ocean between 40° and 60°N. *Earth and Planetary Science Letters* **146**, 29-45.
- d'Errico, F. and Sanchez-Goñi, M. F., 2003. Neandertal extinction and the millennial scale climatic variability of OIS 3. *Quaternary Science Review* **22**, 769-788.
- Grousset, F. E., Labeyrie, L., Sinko, J. A., Cremer, M., Bond, G., Duprat, J., Cortijo, E., and Huon, S., 1993. Patterns of Ice-Rafted Detritus in the glacial North Atlantic (40-55°N). *Paleoceanography* **8**, 175-192.
- Roche, D., Paillard, D., and Cortijo, E., 2004. Constraints on the duration and freshwater release of Heinrich event 4 through isotope modelling. *Nature* **432**, 379-382.
- Sanchez-Goñi, M. F., Cacho, I., Turon, J.-L., Guiot, J., Sierro, F. J., Peypouquet, J.-P., Grimalt, J. O., and Shackleton, N. J., 2002. Synchronicity between marine and terrestrial responses to millennial scale climatic variability during the last glacial period in the Mediterranean region. *Climate Dynamics* **19**, 95-105.
- Sepulchre, P., Ramstein, G., Kageyama, M., Vanhaeren, M., Krinner, G., Sanchez-Goñi, M. F., and d'Errico, F., 2007. H4 abrupt event and late Neanderthal presence in Iberia. *Earth and Planetary Science Letters* **258**, 283-292.