

94.05B

SESSION 2009

Filière BCPST

SCIENCES DE LA TERRE

Épreuve commune aux ENS de Paris, Lyon et Cachan

Durée : 4 heures

L'usage de calculatrices électroniques de poche à alimentation autonome, non imprimantes et sans document d'accompagnement est autorisé. Cependant, une seule calculatrice à la fois est admise sur la table ou le poste de travail, et aucun échange n'est autorisé entre les candidats.

PREAMBULE

La qualité de la rédaction, la précision des schémas et la concision des réponses seront prises en compte dans l'évaluation.

Les quatre premières parties de ce devoir sont indépendantes les unes des autres. La cinquième partie fait majoritairement appel à vos connaissances et aux résultats des parties précédentes.

Les archives marines du climat de la Terre

La reconstitution des variations passées du climat de la Terre constitue une source précieuse d'informations sur le fonctionnement du système climatique. Ce devoir se focalise sur différents types d'archives sédimentaires du climat en mettant l'accent sur leurs caractéristiques et les limites de leur utilisation. Il permet également de développer plus particulièrement les enseignements qu'elles apportent sur la compréhension de quelques traits majeurs des variations du climat passé de la Terre.

PREMIERE PARTIE

(Temps indicatif : 1 heure)

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

Les coraux récifaux sont des organismes marins présentant un mode de vie et des conditions de développement propices à leur utilisation comme archives des variations du climat de la Terre.

- 1.1 *Rappelez brièvement les conditions environnementales de vie des coraux récifaux.*
- 1.2 Le squelette des coraux est constitué d'aragonite, un carbonate de calcium de formule CaCO_3 . Le calcium de l'aragonite est parfois remplacé par le strontium.

*À quelle famille d'éléments chimiques appartiennent le calcium et le strontium ?
Quelles différences existe-il entre la calcite et l'aragonite ?*

- 1.3 Des études ont été menées sur des coraux actuels de l'archipel du Vanuatu au sud ouest de l'océan Pacifique (Localisation, Figure 1.1). Une radiographie permet l'observation d'une coupe d'un corail récent provenant de cette région (Figure 1.2).

Comment interprétez-vous l'alternance des bandes claires et sombres ?

Le rapport Sr/Ca de l'aragonite a été mesuré le long de la ligne blanche observable sur la Figure 1.2. Parallèlement, la température de l'eau de mer dans laquelle vivait cet organisme a été mesurée au cours de sa croissance. Les résultats sont reportés sur la Figure 1.3.

*Comment varie le rapport Sr/Ca en fonction de la température de l'eau de mer ?
Proposez une hypothèse permettant d'expliquer cette relation ?
En choisissant dix points significatifs sur la Figure 1.3, reportez dans un diagramme le rapport Sr/Ca en fonction de la température.
Calculez l'équation de la relation qui relie ces deux variables.*

- 1.4 On cherche à appliquer cette relation sur un corail fossile provenant de cette région et vieux de 21000 ans.

Par quelle méthode a-t-il été daté ?

Précisez en dix lignes maximum le principe de cette méthode ainsi que les limites et les hypothèses de son application.

- 1.5 *À partir des variations du rapport Sr/Ca mesuré sur cet échantillon (Figure 1.4), calculez la température moyenne des eaux de surface sur la période considérée.
Calculez ensuite l'amplitude maximale des variations saisonnières de température.
Comparez cette amplitude avec celle mesurée aujourd'hui pour la même région.*

Aux latitudes moyennes, certaines observations géologiques permettent d'appréhender les températures de l'atmosphère autour de 21000 ans.

Quelles sont-elles ?

Comparez ces estimations avec les résultats que vous avez obtenus ci-dessus sur les coraux.

Quelles conclusions en tirez-vous ?

- 1.6 *En conclusion de cette partie, dégagez en une dizaine de lignes les intérêts et les limites de l'utilisation des coraux fossiles comme archives des conditions paléoclimatiques de la Terre.*

DEUXIÈME PARTIE

(Temps indicatif : 45 minutes)

Bioturbation et archivage sédimentaire des traceurs du climat

L'archivage à haute résolution du climat de la Terre nécessite que les sédiments porteurs d'information se déposent en continu et qu'ils ne subissent aucune perturbation postérieurement à leur dépôt. Une des principales perturbations qu'ils peuvent subir est liée à l'activité des organismes benthiques vivant dans le sédiment, perturbation qualifiée de bioturbation.

2.1 *Précisez, en une page maximum comprenant un schéma, les caractéristiques générales de la sédimentation actuelle dans les océans. Vous détaillerez notamment la nature et l'origine des constituants majeurs de cette sédimentation ainsi que leur répartition géographique.*

La bioturbation est classiquement considérée comme un mélange diffusif caractérisé par un coefficient de diffusion ici appelé coefficient de bioturbation (Db en cm^2/an). L'effet de la bioturbation sur l'enregistrement d'un traceur climatique peut être appréhendé par la modélisation (Figure 2.1). La colonne sédimentaire est constituée d'une couche supérieure d'épaisseur $L = 10$ cm dans laquelle opèrent la bioturbation et l'enfouissement sédimentaire. Dans la couche sous-jacente, seul l'enfouissement sédimentaire agit. La vitesse d'enfouissement est supposée constante sur l'ensemble de la colonne sédimentaire ($\omega = 0,1$ cm/an).

2.2 Le modèle restitue l'évolution de l'enfouissement d'un traceur déposé initialement à la surface du sédiment.

Calculez la profondeur où se trouverait le traceur 150 ans après son dépôt dans le cas où la bioturbation serait inexistante.

À partir de l'analyse de la Figure 2.1, déterminez l'influence de la bioturbation sur l'enregistrement des traceurs climatiques.

2.3 La quantification de la bioturbation dans les environnements marins actuels utilise des isotopes radioactifs naturellement présents dans les sédiments superficiels. Dans la couche bioturbée, l'activité radioactive (A en Bq/kg) d'un tel isotope obéit à l'équation suivante :

$$Db \frac{d^2 A(x)}{dx^2} - \omega \frac{dA(x)}{dx} - \lambda A(x) = 0 \quad (1)$$

où λ représente la constante de désintégration (an^{-1}) et x représente la profondeur (cm) dans la couche bioturbée exprimée par rapport à l'interface eau-sédiment ($x = 0$).

(1 Bq = 1 Becquerel = 1 désintégration par seconde)

2.3.1. On cherche à résoudre l'équation (1) en supposant que Db et ω sont constants dans la couche bioturbée :

Quelles relations relient α et β à Db , λ et ω pour que la forme générale

$A(x) = A_1 \exp(\alpha x) + A_2 \exp(\beta x)$ soit solution de l'équation (1).

Quels sont les signes de α et de β ?

Déterminez A_1 et A_2 en tenant compte des conditions suivantes :

$$A(0) = A_0 = \text{constante}$$

$$A(x) \rightarrow 0 \text{ quand } x \rightarrow +\infty$$

Donnez l'expression de $A(x)$ et de $\ln(A(x))$.

2.3.2. Au cours d'une campagne océanographique, trois carottes de sédiments superficiels ont été prélevées dans l'océan Atlantique (Tableau 2.1). Chaque carotte a été découpée en tranches de 1 cm d'épaisseur et l'activité en ^{210}Pb a été mesurée au laboratoire sur chaque tranche (Tableau 2.2).

Reportez dans un diagramme le logarithme népérien de l'activité en ^{210}Pb en fonction de la profondeur dans le sédiment pour les trois carottes.

Que constatez-vous ?

À partir de la réponse à la question 2.3.1, donnez la relation qui relie la pente dans un tel diagramme aux paramètres Db , ω et λ .

Donnez l'expression de Db en fonction de cette pente, de λ et de ω .

Calculez les valeurs de Db sur les trois carottes étudiées.

(On donne $\lambda = 0,0311 \text{ an}^{-1}$.)

Carotte n°	1	2	3
Profondeur de prélèvement (m)	3945	455	80
ω (cm/an)	0,002	0,035	0,41

Tableau 2.1 : Quelques caractéristiques des trois carottes prélevées

Carotte 1		Carotte 2		Carotte 3	
Profondeur	Activité	Profondeur	Activité	Profondeur	Activité
cm	Bq/kg	cm	Bq/kg	cm	Bq/kg
0	375	0	520	0	6,5
1	120	5	150	5	5
2	35	8	65	10	3,8

Tableau 2.2 : Activité en ^{210}Pb mesurée le long des trois carottes prélevées dans l'océan Atlantique

2.4 Dans la zone bioturbée, il est possible de comparer l'influence relative de l'enfouissement sédimentaire et de la bioturbation sur l'archivage sédimentaire des traceurs climatiques. On introduit pour cela le nombre de Peclet défini par

$$\text{Pe} = \omega L / \text{Db}$$

Si $\text{Pe} \gg 1$, l'enfouissement domine la bioturbation. Inversement, si $\text{Pe} \ll 1$, la bioturbation domine l'enfouissement.

Pour quelle raison l'enfouissement et la bioturbation agissent-ils inversement sur l'archivage des traceurs climatiques.

À partir des trois points rouges de la Figure 2.2, calculez le nombre de Peclet représentatif des environnements sédimentaires du plateau continental, de la pente et de la plaine abyssale.

On supposera que L vaut 10 cm quel que soit l'environnement.

D'après le calcul précédent et la Figure 2.2, déterminez les environnements sédimentaires pour lesquels la bioturbation domine l'enfouissement.

- 2.5 Le métabolisme de la faune benthique à l'origine de la bioturbation dépend de la teneur en oxygène des eaux de fond et de la quantité de matière organique disponible.

Donnez des exemples d'environnements sédimentaires marins particuliers présents ou passés favorisant la préservation des signaux paléoclimatiques.

TROISIÈME PARTIE

(Temps indicatif : 45 minutes)

Des archives marines de l'évolution du climat de la Terre depuis 60 millions d'années

On cherche dans cette partie à expliquer à partir d'archives marines la mise en place du climat actuel de la Terre. On s'intéresse à la variabilité du climat sur une échelle de temps telle que les perturbations générées par la bioturbation sont négligeables.

3.1 *Donnez quelques preuves géologiques attestant que le climat du début de l'Ère Tertiaire était très différent du climat du dernier million d'années (10 lignes maximum).*

3.2 La Figure 3.1 donne l'évolution de la composition isotopique des tests de Foraminifères benthiques ($\delta^{18}O_c$) depuis 60 millions d'années (Ma).

Donnez la définition du $\delta^{18}O_c$.

Comment est-il mesuré ?

Expliquez les deux causes principales de variation du $\delta^{18}O_c$.

3.3 On cherche à déterminer la variation de la température des eaux de fond entre 52 Ma et aujourd'hui. Pour cela, une relation de calibration est proposée :

$$T = 16,9 - 4,2 (\delta^{18}O_c - \delta^{18}O_w)$$

T représente la température en °C et $\delta^{18}O_w$ la valeur du $\delta^{18}O$ de l'eau de mer à l'époque considérée.

A l'aide de la Figure 3.1 et dans l'hypothèse où $\delta^{18}O_w$ n'a pas varié entre 52 Ma et 38 Ma, calculez l'écart de température (ΔT) des eaux de fond entre ces deux âges :

$$\Delta T = T(52 \text{ Ma}) - T(38 \text{ Ma}).$$

Cette hypothèse vous semble-t-elle justifiée, si oui pourquoi ?

On estime que $\delta^{18}O_w$ a augmenté de 1 ‰ entre 38Ma et aujourd'hui.

À partir de la Figure 3.1, calculez l'écart de température des eaux de fonds entre 38 Ma et aujourd'hui.

De combien de degrés la température des eaux de fond a-t-elle varié depuis 52 Ma ?

Quelle est l'origine de cette variation ?

3.4 *À partir des informations contenues dans la partie droite de la Figure 3.1, déterminez les processus possibles à l'origine de la mise en place du climat de la Terre que nous connaissons depuis un million d'années.*

3.5 La Figure 3.2 présente les variations du $\delta^{18}O_c$ des Foraminifères benthiques depuis 2,75 millions d'années.

Quelle est la période des oscillations entre 2,75 Ma et 0,6 Ma ?

Quelle est la période des oscillations entre 0,6 Ma et l'actuel ?

Quelle est l'origine de ces oscillations ?

QUATRIÈME PARTIE

(Temps indicatif : 1 heure)

Archives climatiques marines et peuplement humain de l'Europe occidentale

L'Homme moderne s'est installé en Europe et dans le nord de l'Espagne entre 42000 et 41000 ans après avoir quitté le Proche Orient. Ce développement a eu un impact sur la disparition de l'Homme de Néanderthal. Dans le sud de l'Espagne, par contre, l'Homme moderne n'apparaît que bien plus tard il y a 35200 ans seulement. Cette région peut être considérée comme une zone refuge provisoire pour l'Homme de Néanderthal. Cette période coïncide avec un épisode climatique nommé H4 compris entre 40100 ans et 37800 ans. À partir de l'étude de carottes marines, la quatrième partie de ce devoir cherche à identifier les causes possibles de l'absence de l'Homme moderne dans le sud de l'Espagne pendant cet épisode H4.

- 4.1 Deux carottes sédimentaires nommées MD99-2331 et MD95-2042 ont été prélevées au large de l'Espagne. Différents traceurs mesurés le long de ces carottes ont enregistré l'évolution de paramètres climatiques et environnementaux pendant l'épisode H4 (Figure 4.1).

Comment expliquez-vous la présence de grains de pollen dans ces carottes ?

À partir des courbes d'évolution des pollens, comment évolue la flore du sud-ouest et du nord-ouest de l'Espagne pendant l'épisode H4 ?

Quelle méthode permet de reconstituer les températures de surface de l'océan (SST) ?

Quelles sont les caractéristiques des variations de température des eaux de surface pendant l'épisode H4 ?

Quelle conclusion tirez-vous sur l'évolution du climat de l'Espagne et plus généralement de l'ouest de l'Europe pendant l'épisode H4 ?

- 4.2 Les modèles climatiques globaux proposent une reconstitution des variations des paramètres climatiques avant et pendant l'épisode H4.

D'après les résultats des simulations (Figure 4.2) et des observations sur les carottes MD95-2042 et MD99-2331, décrivez l'évolution du climat pendant l'épisode H4 au sud-ouest et au nord-ouest de l'Espagne.

- 4.3 *Proposez une hypothèse permettant d'expliquer l'absence de l'Homme moderne pendant l'épisode H4 dans le sud de l'Espagne.*

- 4.4 Dans les carottes MD95-2042 et MD99-2331, des sédiments particuliers appelés IRD ont été retrouvés pendant l'épisode H4.

À partir de la Figure 4.3, identifiez les constituants sédimentaires typiques observés avant et pendant l'épisode H4.

- 4.5 Les sédiments de types IRD se retrouvent dans d'autres carottes couvrant une large région de l'Atlantique Nord.

À partir de l'étude de la Figure 4.4, proposez une origine géographique possible pour les sédiments de type IRD ?

- 4.6 Des mesures du $\delta^{18}O$ dans les tests de foraminifères planctoniques présents avant et pendant l'épisode H4 sont reportées sur la Figure 4.5.

Quelle variation du $\delta^{18}O$ accompagne l'épisode H4 ?

Comment évolue cette variation géographiquement ?

Proposez une hypothèse pour son origine.

- 4.7 Les modèles climatiques globaux permettent de tester différentes hypothèses concernant l'origine de l'épisode H4 et notamment l'influence d'une libération brutale d'eau douce dans l'Atlantique nord. Les paramètres testés sont la quantité d'eau douce libérée dans le système océanique et la durée de l'épisode de libération. Le modèle prédit la température de l'océan de surface et l'évolution de sa salinité. Il calcule également la valeur du $\delta^{18}O$ des foraminifères de surface en équilibre avec ces conditions.

Pourquoi l'arrivée d'eau douce entrainerait-elle une diminution du $\delta^{18}O$?

À partir de la comparaison du $\delta^{18}O$ prédit et de celui mesuré sur les carottes (Indice de similarité, Figure 4.6), discutez de l'origine des variations du $\delta^{18}O$ pendant l'épisode H4.

Dans ce cas, quelle est la durée moyenne supposée pour l'épisode H4 ?

Quelle est la valeur moyenne du flux d'eau douce introduit dans l'océan pendant l'épisode H4 ?

Discutez les deux résultats.

- 4.8 À partir des valeurs précédentes et en supposant constant le flux d'eau douce pendant l'épisode H4, calculez la hausse du niveau de la mer générée par l'épisode H4.

Le volume total des océans juste avant l'épisode H4 est de $1,33 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ pour une profondeur moyenne de l'océan de 3700 m.

Quelle est la vitesse moyenne de montée du niveau de la mer pendant l'épisode H4 ? Comparez cette valeur avec la vitesse actuelle de remontée du niveau de la mer.

Quelle est l'origine de cette dernière ?

- 4.9 *Quelle relation faites-vous entre le climat de l'ouest de l'Europe, le remplacement de l'Homme de Néanderthal par l'Homme moderne et l'origine de l'épisode climatique H4 ?*

CINQUIÈME PARTIE

(Temps indicatif : 30 minutes)

Synthèse

A l'aide des informations précédentes et de vos connaissances sur les archives du climat de la Terre, construisez un tableau synthétique d'une page présentant les caractéristiques des principales variations climatiques de la Terre enregistrées par celles-ci. Vous préciserez notamment les causes, les échelles de temps et le type d'archives utilisées pour contraindre ces variations.

Fin de l'épreuve

PREMIÈRE PARTIE

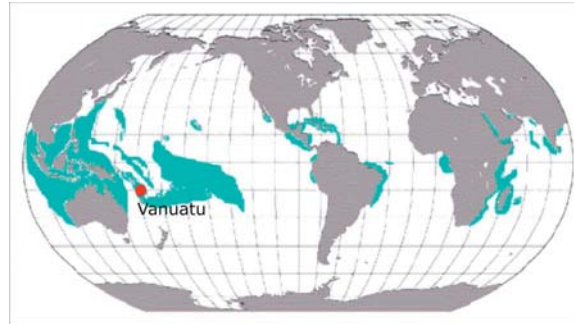


Figure 1.1: Carte de localisation des îles du Vanuatu. En vert : répartition actuelle des récifs coralliens.

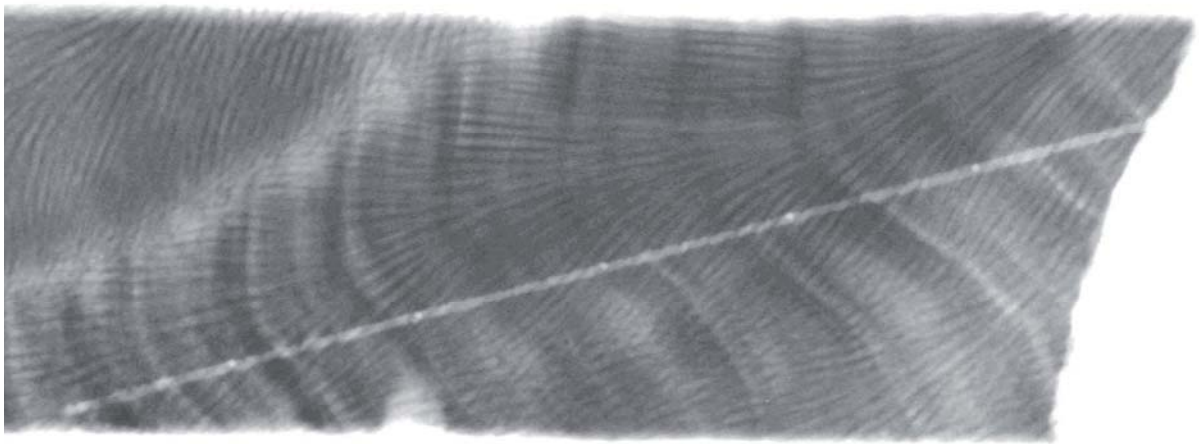


Figure 1.2 : Radiographie au rayon X d'une coupe longitudinale d'un corail récifal.

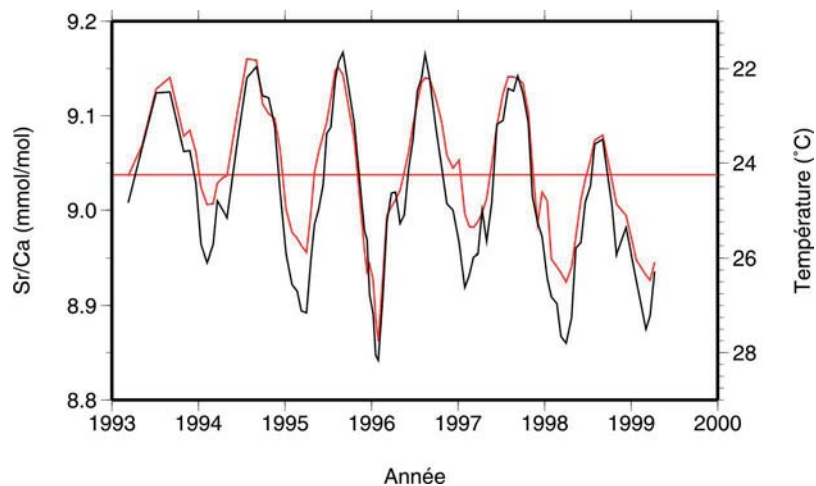


Figure 1.3 : Variations temporelles du rapport Sr/Ca d'un corail des Vanuatu (courbe noire) et de la température des eaux marines de surface (courbe rouge). La ligne horizontale rouge indique la température moyenne sur la période considérée.

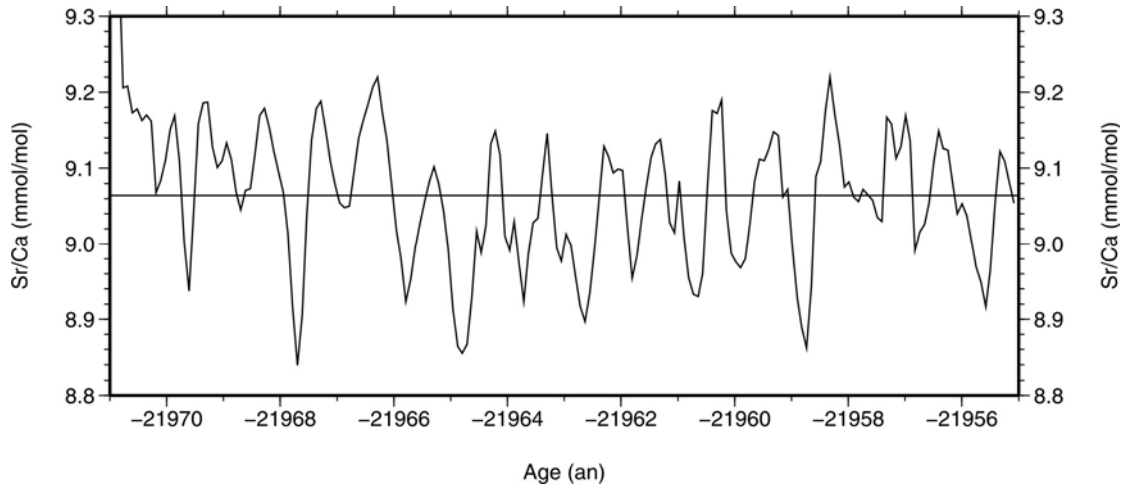


Figure 1.4 : Courbe de variation du rapport Sr/Ca sur un corail ancien des Vanuatu. La ligne horizontale noire correspond à la valeur moyenne du rapport Sr/Ca sur la période considérée.

DEUXIÈME PARTIE

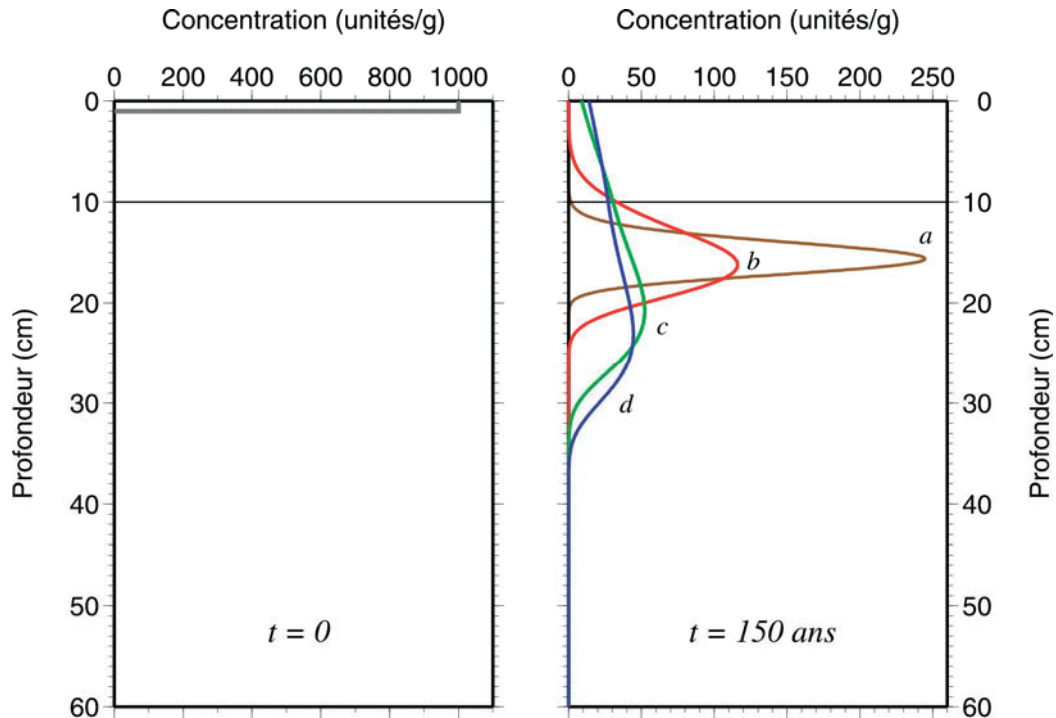


Figure 2.1 : Bioturbation et enfouissement d'un traceur climatique approché par modélisation : A gauche : Situation initiale où le traceur est déposé à la surface du sédiment sur une épaisseur d'un centimètre à la concentration de 1000 unités par gramme (courbe grise). A droite : Concentration du traceur 150 ans après son dépôt. Courbe a : $D_b = 0,01 \text{ cm}^2/\text{an}$; courbe b : $D_b = 0,05 \text{ cm}^2/\text{an}$; courbe c : $D_b = 0,5 \text{ cm}^2/\text{an}$ et courbe d : $D_b = 1 \text{ cm}^2/\text{an}$. Le trait fin noir horizontal positionne la base de la couche bioturbée.

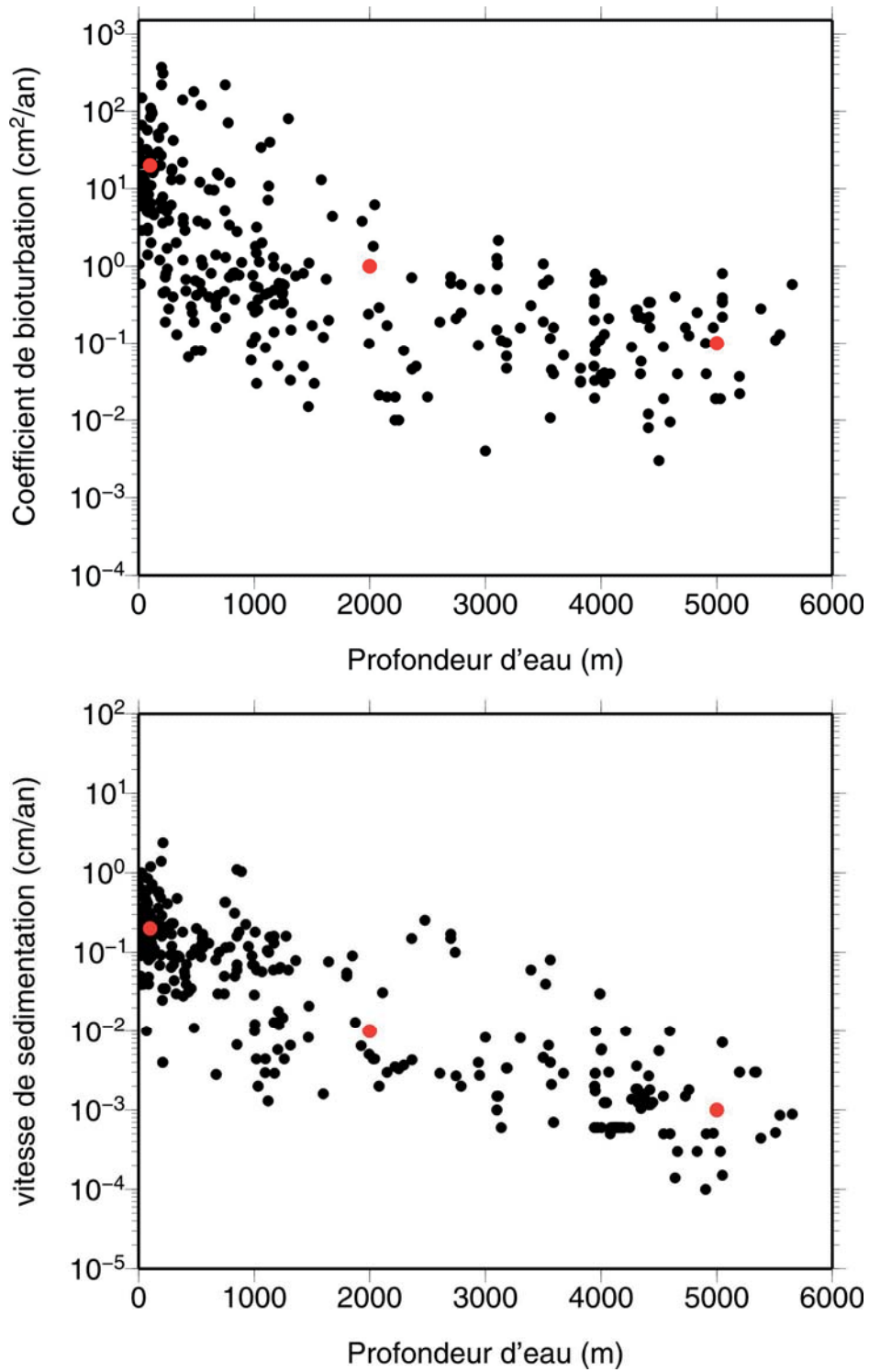


Figure 2.2 : Compilation des valeurs des coefficients de bioturbation (D_b , en haut) et des vitesses d'enfouissement (ω , en bas) mesurées sur des carottes sédimentaires et exprimées en fonction de la profondeur d'eau à laquelle le prélèvement a été réalisé.

TROISIÈME PARTIE

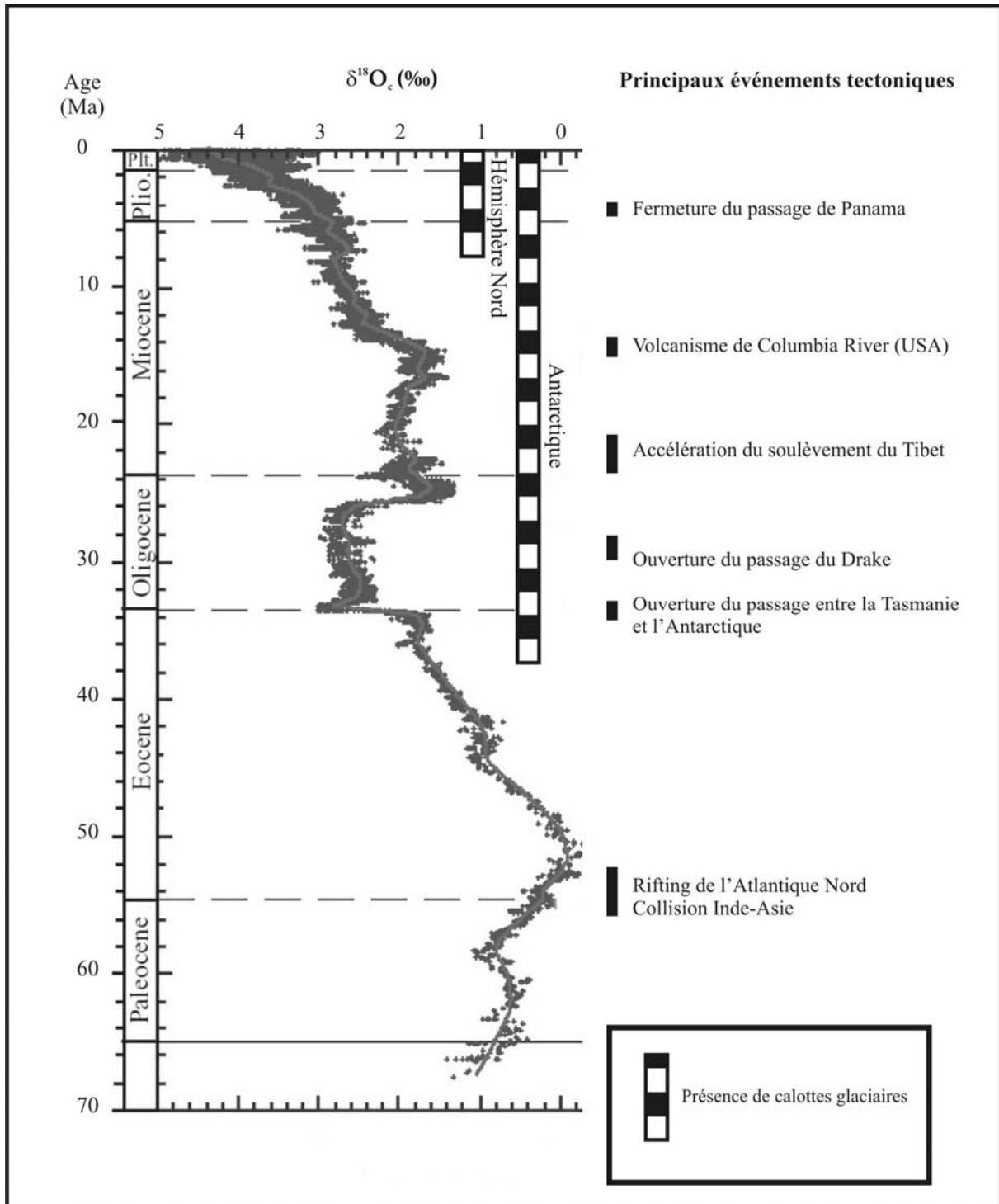


Figure 3.1 : Évolution du $\delta^{18}\text{O}_e$ des foraminifères benthiques depuis 65 Millions d'années.

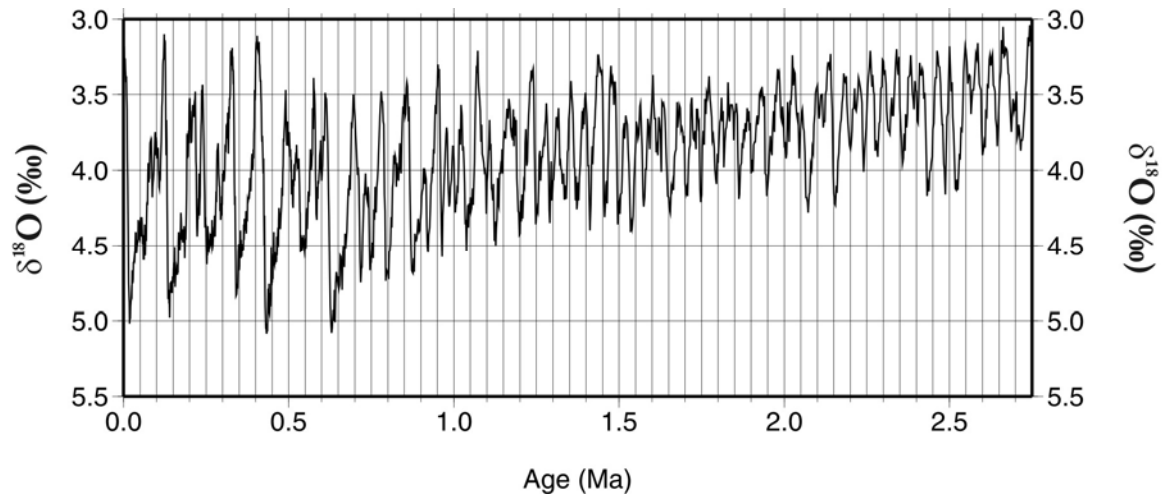


Figure 3.2 : Courbe d'évolution du $\delta^{18}\text{O}_e$ des foraminifères benthiques depuis 2,75 Ma.

QUATRIÈME PARTIE

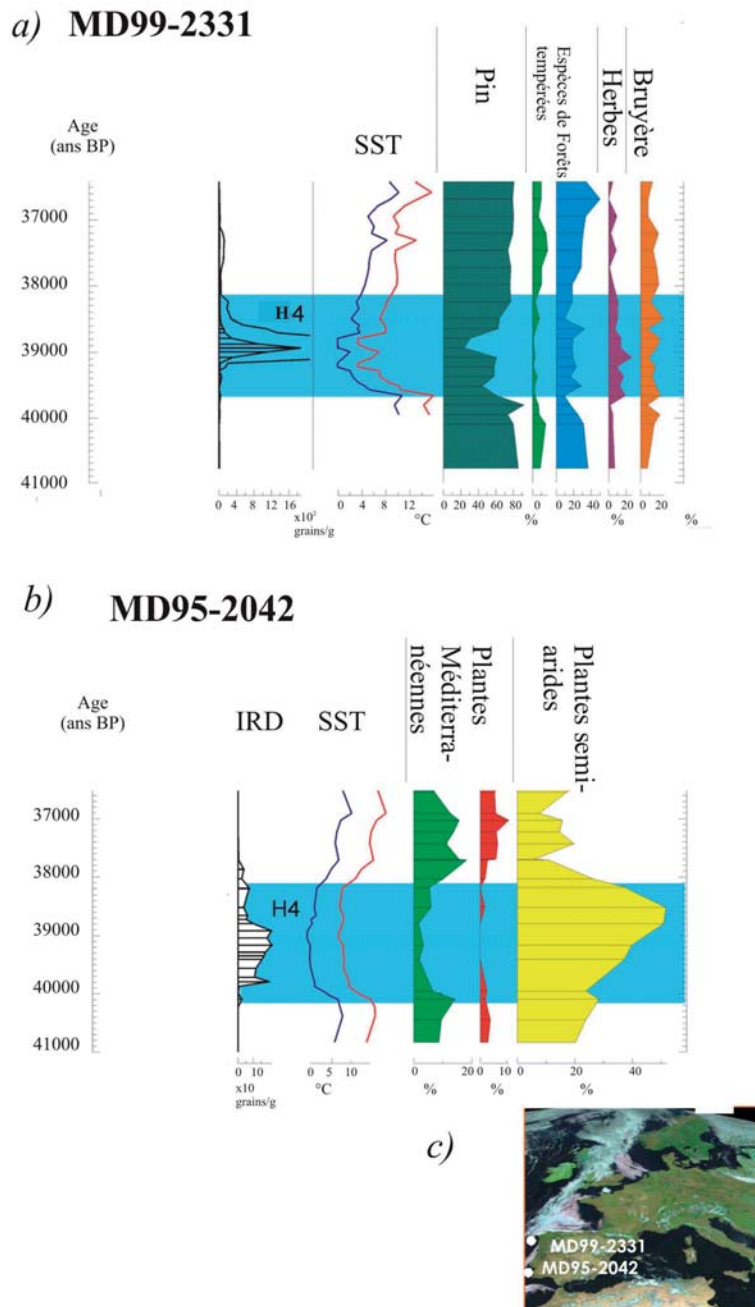


Figure 4.1 : Évolution de traceurs climatiques mesurés sur les carottes MD99-2331 (a) et MD95-2042 (b) pendant l'épisode H4. IRD : concentration en grains de type IRD exprimée par gramme de sédiment. SST : reconstitution des températures de surface de l'océan en février (bleu) et en août (rouge). Les histogrammes colorés de droite sont des extraits des diagrammes polliniques des carottes. L'abondance relative des différents pollens est exprimée en pourcentage du total des pollens présents dans chaque niveau de la carotte. c) Localisation des carottes.

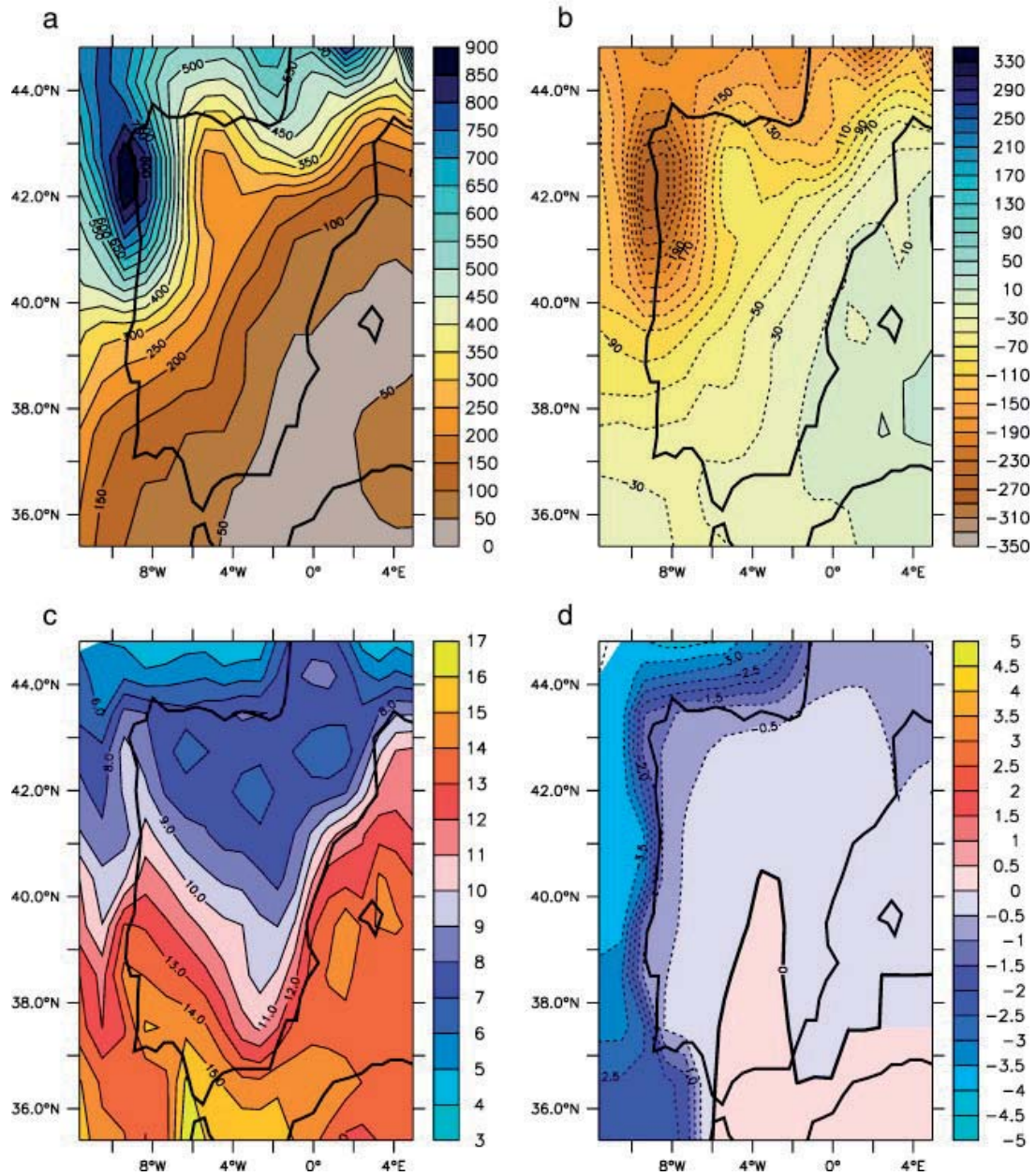
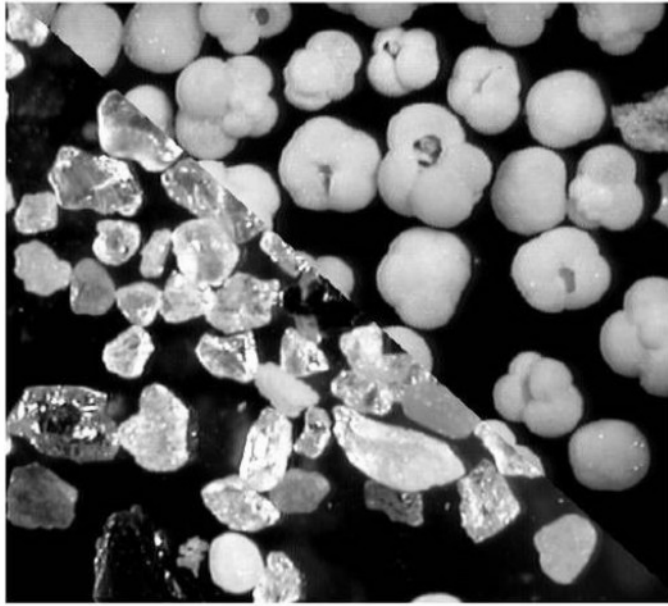


Figure 4.2 : Simulation numérique du changement climatique induit par l'épisode H4. (a) Précipitation annuelle totale (mm) avant H4. (b) Différence de précipitations annuelles entre l'épisode H4 et la période avant H4. (c) Moyenne annuelle des températures de surface (°C) avant l'épisode H4. (d) Différence de températures annuelles de surface entre l'épisode H4 et la période avant H4.

250 μm

Sédiments classiques de l'Atlantique Nord



Sédiments des niveaux H

Figure 4.3 : Sédiments marins dominants présents avant l'épisode H4 (en haut à droite) et pendant l'épisode H4 (en bas à gauche).

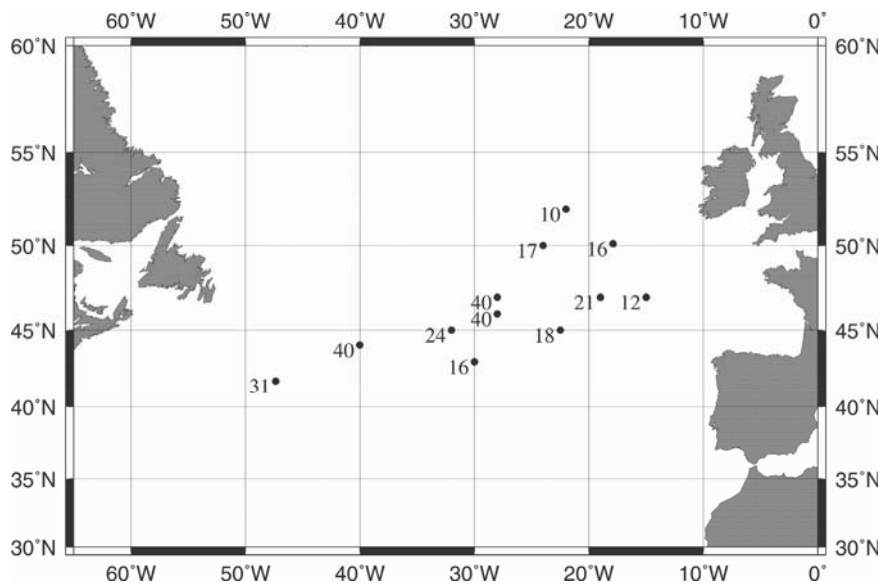


Figure 4.4 : Quelques épaisseurs (en cm) du niveau à IRD de l'épisode H4.

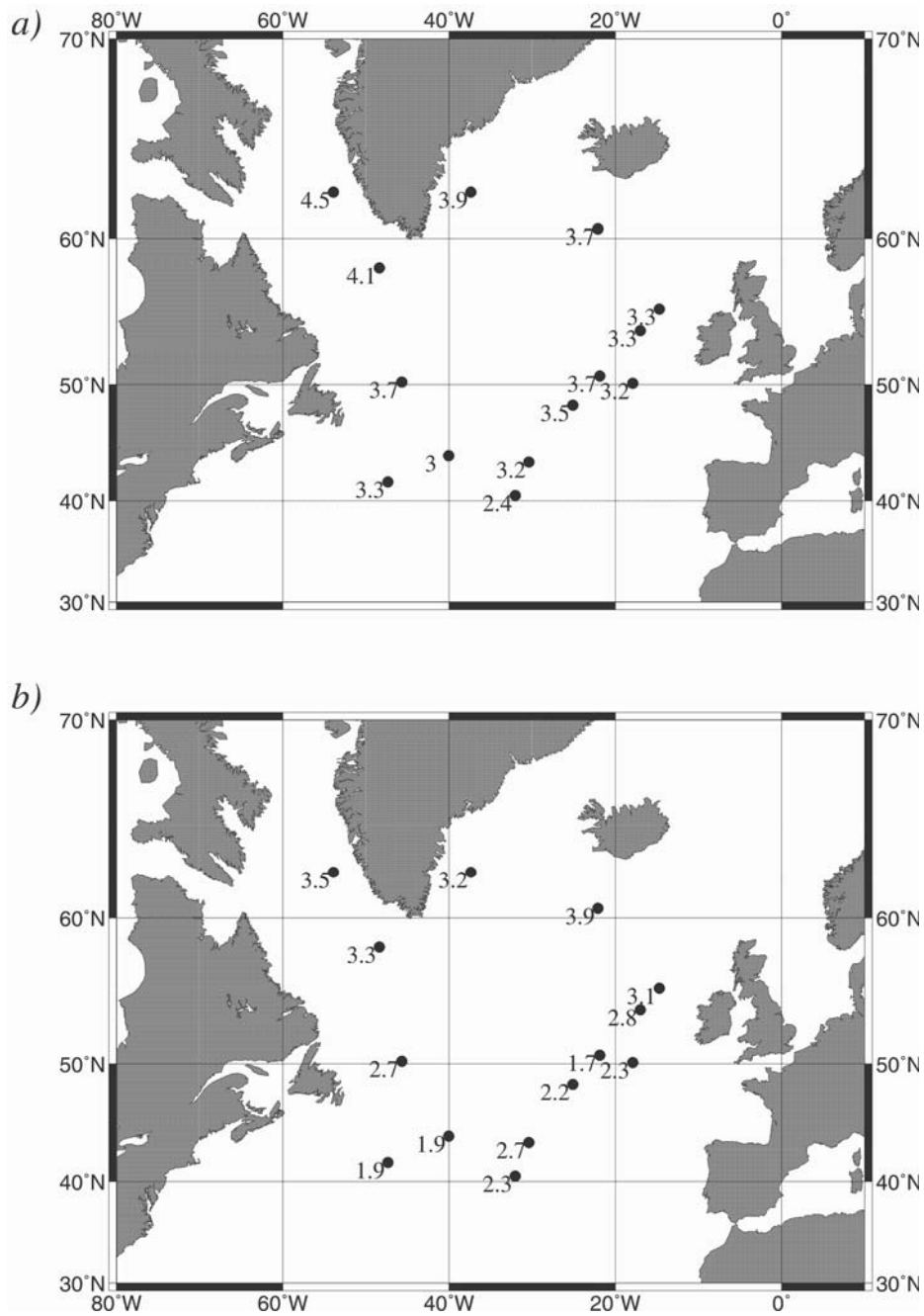


Figure 4.5 : Valeurs du $\delta^{18}O_c$ (‰) des tests de foraminifères planctoniques (a) avant l'épisode H4 et (b) pendant l'épisode H4.

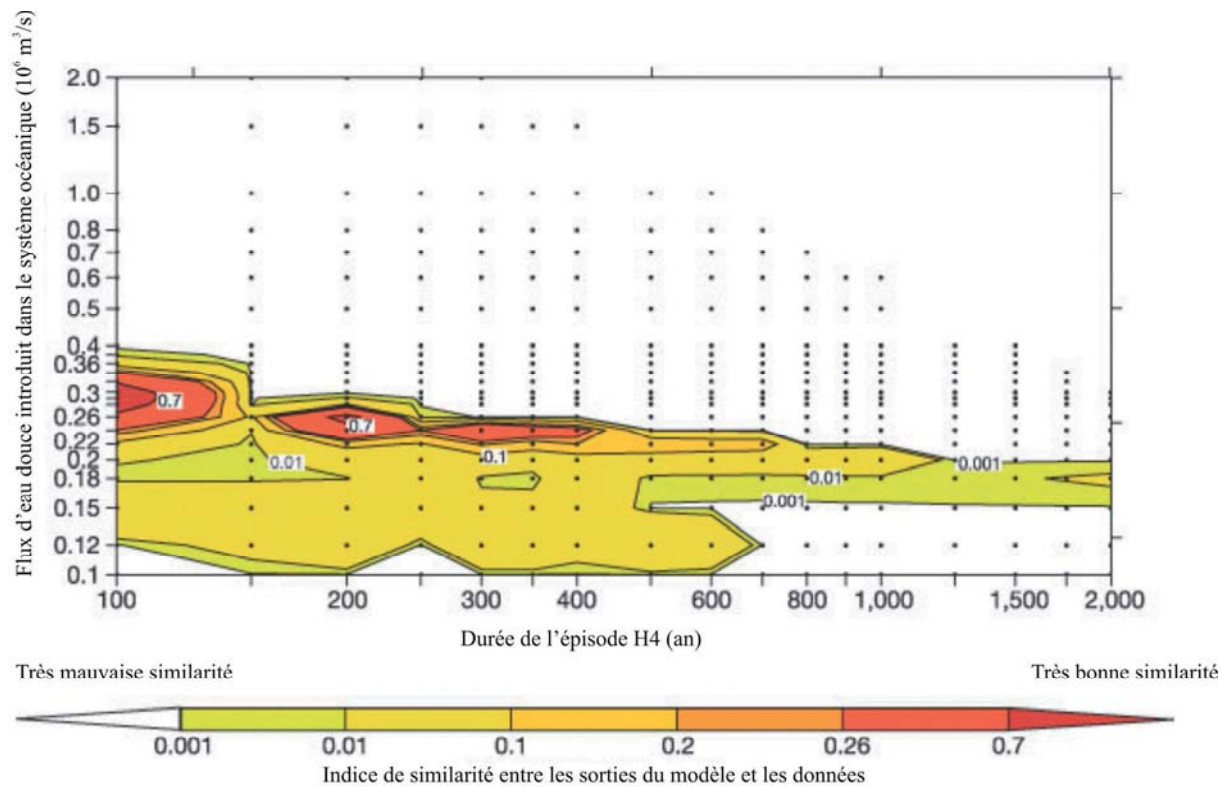


Figure 4.6 : Indice de similarité entre le $\delta^8\text{O}_c$ modélisé et le $\delta^8\text{O}_c$ mesuré sur les carottes pendant l'épisode H4. Le modèle rend correctement compte des observations pour une similarité supérieure à 0,7.