

**64.03B**

SESSION 2006

---

**Filière BCPST**

**SCIENCES DE LA TERRE**

Epreuve 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.*

---

# La séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique

## Partie 1. L'érosion physique des chaînes de montagne

1. Qu'est ce que l'érosion physique des chaînes de montagne et quels en sont les principaux agents ? Citez deux preuves géologiques de l'érosion des chaînes de montagne.
2. En calculant la masse de sédiments accumulés depuis le début de la collision Inde-Asie (50 millions d'années) dans les bassins sédimentaires péri-himalayens, on a déduit que la masse de chaîne himalayo-tibétaine érodée atteignait  $70 \times 10^{15}$  tonnes. En déduire la vitesse d'érosion moyenne de la chaîne sur cette période de temps (en mm/an), sachant que la surface concernée est d'environ  $10 \times 10^6$  km<sup>2</sup> et que la densité moyenne des sédiments est de 2,5. Comparez cette vitesse à la vitesse moyenne de dérive des plaques océaniques ? Quel commentaire cela vous inspire-t-il ?
3. Sachant que le départ de matière des zones montagneuses provoque un réajustement isostatique dont vous expliquerez le principe simplement, calculez de combien la chaîne est montée par ce processus ? On prendra les densités de la croûte continentale et celle du manteau supérieur de 2,7 et 3,1 respectivement.
4. L'érosion est-elle le seul mécanisme créateur de reliefs ? Répondez en vous inspirant de l'exemple de la chaîne alpine européenne.

## Partie 2. L'altération des roches

On rappelle que les masses molaires des éléments suivants sont : C : 12g/mol ; Ca : 40 ; Al : 27 ; Si : 28 ; O : 16 ; H : 1 ; Na : 23.

1. Rappelez ce qu'on appelle altération chimique.
2. Les sols sont l'endroit préférentiel de l'altération.  
Il existe en Californie des sols qui se sont développés sur des terrasses marines dont la formation est bien datée. Ces sols se sont développés sur les alluvions granitiques en provenance des montagnes de la Sierra Nevada.  
Les principales phases minéralogiques ainsi que la teneur en calcium à différentes profondeurs d'un sol daté de 50 milliers d'années sont reportées sur la Figure 1. La réaction impliquant le pôle pur calcique des plagioclases peut s'écrire :  
$$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$$
  - Expliquez qualitativement les transformations minéralogiques qui se sont produites dans le sol.
  - Quelle est l'origine des ions H<sup>+</sup> ?
  - En supposant que la densité du sol ne varie pas avec la profondeur et est égale à celle de la roche mère (d=2,5), calculez la quantité de calcium perdu en 50000 ans dans une colonne de sol par rapport à la roche mère initiale. Déterminez ainsi la vitesse de libération du calcium en tonnes par km<sup>2</sup> et par an, c'est-à-dire la vitesse d'altération du calcium.
3. La dissolution du gaz carbonique dans l'eau de pluie dépend de la pression partielle de ce gaz dans l'atmosphère et de la constante de dissolution du CO<sub>2</sub> gazeux en acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Écrivez la réaction de dissolution et calculez la concentration atmosphérique de 370 ppmV en CO<sub>2</sub> (parties par millions en volume, c'est-à-dire  $370 \times 10^{-6}$  mol de CO<sub>2</sub> par mol d'air en supposant que les volumes molaires de CO<sub>2</sub> et

d'air sont les mêmes), les concentrations de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  et de  $\text{HCO}_3^-$  à l'équilibre attendues dans l'eau. On supposera que l'eau étant pure, la balance électrique (ou électroneutralité) impose que la concentration en  $\text{HCO}_3^-$  soit égale à celle des protons. La constante de dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau est  $K = 10^{-1,5}$  à 25 °C et 1 bar, la constante de dissociation de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  est de  $10^{-6,4}$ .

- La pression de  $\text{CO}_2$  dans les sols est parfois de 100 fois celle de l'atmosphère. Pourquoi une telle différence ? Refaites le même calcul qu'en 3., avec une pression partielle de 100 fois celle de l'atmosphère.
- On a mesuré dans une rivière de l'île de la Réunion, la composition suivante :  $\text{HCO}_3^-$  :  $1,8 \times 10^{-3}$  mol/l ;  $\text{Ca}^{2+}$  :  $0,32 \times 10^{-3}$  mol/l ;  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  :  $10^{-3}$  mol/l. Cette rivière ne draine que du basalte, dans lequel la quantité de carbone est négligeable. Qu'en déduisez vous sur l'origine des ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et de façon plus générale, sur le rôle de l'altération des roches à la surface de la Terre.
- La quantité d'eau transitant dans cette rivière est de  $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , pour une surface de bassin versant d'environ  $30 \text{ km}^2$ . Calculez la vitesse d'altération du calcium dans ce bassin de l'île de la Réunion et comparez votre chiffre à celui déduit de l'analyse des sols californiens. Que concluez vous ? Calculez également la vitesse en  $\text{mol}/\text{km}^2/\text{an}$  de consommation de  $\text{CO}_2$  atmosphérique par altération des basaltes.

### Partie 3. Le rôle de la température sur l'altération des roches

- Rappelez sur un schéma les grandes étapes du cycle du carbone à l'échelle des temps géologiques. Indiquez en particulier la réaction de précipitation du calcaire à partir des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  et montrez en quoi la précipitation du calcaire piège du dioxyde de carbone atmosphérique.
- L'altération des roches est-elle sensible à la température moyenne, donc au climat ? Tentez de rassembler quelques exemples montrant que l'altération des roches dépend du climat. Citez quelques éléments d'explications qualitatives.
- On donne dans le tableau suivant les concentrations en ion bicarbonate mesurées dans des eaux de provinces volcaniques. Montrez en reportant ces données dans un diagramme approprié que les concentrations en ion bicarbonates des îles suivent une loi de type Arrhenius.

On rappelle qu'une loi d'Arrhenius est une loi du type  $C \cdot \exp(-E/RT)$ , C une constante, E une énergie d'activation, R la constante des gaz parfaits et T la température en kelvin. Quelle conclusion en tirez vous ?

Provinces	$\text{HCO}_3^-$ $\mu\text{mol/l}$	T °C
Trapps du Deccan	2 719	27
Islande	415	2
Java	1 987	25
Massif central	686	8,7
Réunion	1 311	17
Sao Miguel (Açores)	763	16

- L'océan est sursaturé en carbonate de calcium, ainsi tout apport de calcium et d' $\text{HCO}_3^-$  à l'océan s'accompagne de la précipitation de carbonate de calcium par certains êtres vivants. Écrivez la réaction de précipitation du calcaire. Faites ensuite le bilan global des réactions d'altération libérant du calcium et de la précipitation des carbonates dans l'océan. Comment la Terre va-t-elle réagir à une augmentation de la teneur en dioxyde de carbone, donc de la température ?

5. Les trapps du Deccan constituent un des affleurements de roche basaltique les plus vastes au monde. Ils sont nés d'une grande éruption, relativement rapide, il y a 65 millions d'années. On a estimé que la quantité de  $\text{CO}_2$  qui avait été injectée dans l'atmosphère à cette occasion fut de  $1,6 \times 10^{18}$  mol de carbone. La surface de basaltes exposée est  $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ . Nous supposons qu'elle n'a pas varié depuis leur mise en place.

En supposant que la quantité de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère a été, à l'échelle géologique, essentiellement consommée par l'altération des basaltes du Deccan, selon une cinétique de premier ordre ( $dN/dt = -kN$ , où  $k$  est la constante de vitesse et  $N$  la quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère) estimez le temps qu'il a fallu à la Terre pour résorber l'excès de gaz carbonique dans l'atmosphère ?

Pour déterminer  $k$ , on utilisera la vitesse de consommation de  $\text{CO}_2$  déterminée plus haut à la Réunion, en supposant que les trapps, qui se sont mis en place à la même latitude, se sont altérés aussi vite. Notez bien que cette vitesse correspond à la quantité de carbone dans l'atmosphère actuelle, qui est de  $5 \times 10^{16}$  mol de carbone.

#### Partie 4. Le rôle des chaînes de montagne sur l'altération globale

Afin d'évaluer le rôle de l'érosion physique sur la consommation de  $\text{CO}_2$  atmosphérique par l'altération des roches, nous distinguerons arbitrairement deux régimes d'érosion extrêmes : l'érosion dans les montagnes et l'érosion dans les plaines. Ces régimes sont représentés actuellement par le Gange qui draine l'Himalaya et le Congo qui draine le bouclier centrafricain.

Chacun de ces fleuves est caractérisé par une érosion mécanique  $h$  que nous exprimons en mm/an. Il s'agit de l'épaisseur de sol qui est évacuée annuellement par les processus d'érosion physique. Nous supposons que le sol est en état stationnaire, donc que la quantité de matière exportée est aussi celle qui est produite pendant le même intervalle de temps. Nous noterons  $S$  la surface du bassin versant,  $\phi$  la porosité du sol (rapport du volume de vide sur le volume total) et  $r$  le rayon des grains constituant le sol (on suppose que le sol n'est constitué que d'un seul type de grain sphérique)

1. Établissez la relation entre l'épaisseur du sol produit chaque année  $h$  et  $N$  (le nombre de grains constituant ce sol dans le bassin versant),  $S$ ,  $r$  et  $\phi$ .
2. Des expériences en laboratoire ont déterminé les vitesses d'altération des principaux minéraux (en mol d'ions dissous par unité de surface du minéral et par unité de temps). On notera  $R$  cette vitesse en supposant que le sol n'est constitué que d'un seul minéral. Donnez l'expression de  $W$  la quantité d'éléments dissous libérés par unité de temps en fonction de  $N$ ,  $R$  et  $r$  dans le bassin versant. Donnez l'expression de  $W'$ , la quantité d'éléments dissous libérés par unité de temps et par unité de surface de bassin versant.
3. En déduire la relation entre  $W'$  et  $h$ ,  $R$ ,  $r$  et  $\phi$ .
4. Exprimez le rapport  $\Omega = W_m'/W_p'$  où  $W_m'$  désigne le flux d'éléments dissous libéré par les chaînes de montagne (par unité de surface et par unité de temps) et  $W_p'$  le flux libéré (par unité de surface et par unité de temps) par les régions de plaine. On supposera les mêmes valeurs de porosité pour les sols de plaine et ceux de montagne.
5. Les expériences en laboratoire donnent pour la kaolinite (un minéral caractéristique des sols de plaine) et le feldspath oligoclase (un minéral que nous supposons représentatif des sols de montagne) des  $R$  de  $0,1 \times 10^{-12} \text{ mol/m}^2/\text{s}$  et  $2 \times 10^{-12} \text{ mol/m}^2/\text{s}$ . La taille moyenne des grains dans le sol est de  $2,5 \text{ }\mu\text{m}$  dans les plaines alors qu'elle atteint  $100 \text{ }\mu\text{m}$  dans les sols montagneux. Sachant que l'érosion physique en montagne

est environ 10 fois plus rapide qu'en plaine (comme l'indique la comparaison entre le bassin du Congo et celui du Gange), déduisez-en le rapport  $\Omega$  pour la Terre actuelle. Qu'en concluez vous sur le rôle des chaînes de montagne sur la consommation de  $\text{CO}_2$  par l'altération des roches ? Quel est le paramètre limitant  $\Omega$  dans la formule que vous vous venez d'utiliser et quels mécanismes physiques naturels permettraient d'augmenter  $\Omega$  ?

6. Une courbe de la Figure 2 montre l'évolution de la composition isotopique en oxygène des tests calcaires benthiques (profondeur supérieure à 1000 mètres) dans l'ensemble des océans mondiaux depuis la fin de l'ère tertiaire. Après avoir rappelé brièvement le principe de l'utilisation des isotopes de l'oxygène pour la détermination des paléotempératures, commentez cette courbe. La seconde courbe de la Figure 2 montre quant à elle l'évolution du volume de sédiments érodés de la chaîne Himalayenne et accumulés dans les bassins sédimentaires asiatiques (par exemple le Golfe du Bengale). Quelle hypothèse la comparaison entre les deux courbes de la Figure 2 permet-elle de formuler ?
7. Sachant que la surface de la chaîne himalayo-tibétaine érodée sur les derniers 20 Ma est de 5 millions de  $\text{km}^2$ , que la vitesse de libération du calcium ( $R_{\text{Ca}}$ ) est de  $3 \times 10^{-12}$   $\text{mol/m}^2/\text{s}$ , que la vitesse d'érosion physique (supposée constante sur la période considérée) est de 200 mm/1000 ans, et que le rayon moyen des grains du sol est de 100  $\mu\text{m}$ , évaluez l'impact de la mise en place de la chaîne himalayenne sur le flux de calcium aux océans et ensuite sur la quantité de carbone consommée à l'atmosphère. On prendra une porosité de 50%. Le contenu actuel de l'atmosphère (correspondant à une concentration de 370 parties par millions en volume ppmV) est de  $750 \times 10^{15}$  g de carbone.

## Partie 5. La séquestration du $\text{CO}_2$ anthropique

On donne sur la Figure 3, la courbe des émissions de  $\text{CO}_2$  anthropogénique depuis la première révolution industrielle due à la combustion des matières organiques fossiles.

1. Après avoir modélisé cette évolution par deux segments de droites (1850-1950 puis 1950-2000) et après avoir calculé les équations de ces deux droites, calculez la quantité totale de carbone fossile introduite par l'homme dans l'atmosphère par la combustion de matières fossiles.
2. Sachant que la fabrication des ciments et la déforestation ont également contribué à l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, à hauteur de 100 à 200 PgC, calculez alors quelle devrait être la teneur en  $\text{CO}_2$  en partie par millions par volume (ppmV) de l'atmosphère si ce  $\text{CO}_2$  s'y était accumulé passivement ? Pour cela, on donne le volume de l'atmosphère ( $3,86 \times 10^9$   $\text{km}^3$ ), la masse molaire du carbone (12 g/mol) et le volume molaire du  $\text{CO}_2$  (22,4 l/mol). La teneur en  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère était de 280 ppmV en 1850 et en 2000 de 365 ppmV. Quelle conclusion en tirez vous ?
3. Quelles sont les formes du carbone inorganique dans l'océan ? Donner les principales relations mathématiques qui les relient (les pK de la première et de la seconde acidité sont 6,4 et 10,3 respectivement). Au pH de 8,3 de l'eau de mer de surface, quelle est la forme prépondérante ?
4. De grands programmes océanographiques internationaux ont récemment mesuré la quantité de carbone anthropogénique piégée par l'océan depuis le début de l'ère industrielle. La carte de la Figure 4 donne l'inventaire de C anthropogénique (en mol

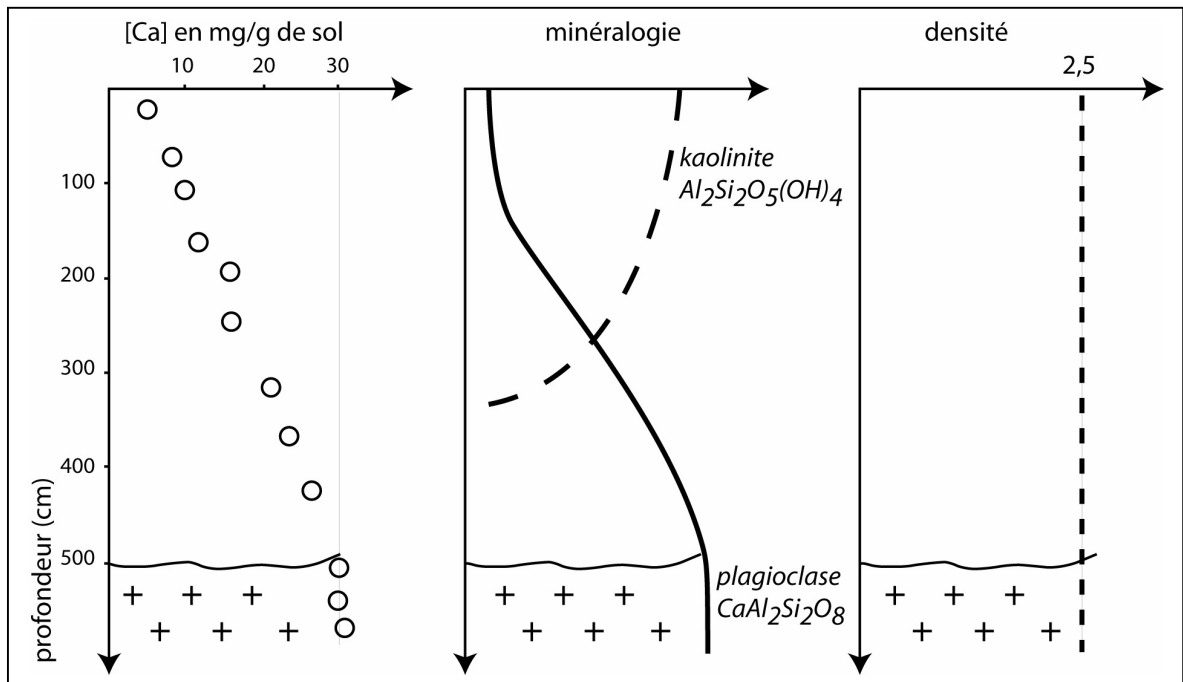
par  $m^2$ ) dans l'océan mondial et montre comment ce carbone se répartit en fonction de la profondeur dans deux sections N-S.

Commentez les Figures 4A, B et C. Expliquez pourquoi l'océan s'est comporté depuis le début de l'ère industrielle comme une pompe à  $CO_2$  ? Pourquoi l'océan n'est-il pas entièrement contaminé par du carbone anthropogénique et comment expliquer la façon dont il y pénètre ?

5. La concentration de carbone d'origine anthropogénique dans l'océan est en moyenne de  $7,2 \mu\text{mol/l}$ . Sachant que le volume de l'océan est de  $1,14 \times 10^{21} \text{ l}$ , déduisez-en la quantité totale de carbone que l'océan a piégé ? Comparez cette quantité au stock de carbone que les activités humaines ont introduit dans le système océan-atmosphère.
6. La coquille des organismes marins qui fabriquent du calcaire subit une dissolution lorsqu'ils meurent. On estime que 45 % à 65 % des tests calcaires sont redissous dans leur chute vers le fond. Comment expliquez vous ceci ? Des observations très récentes montrent que les organismes marins qui sécrètent le carbonate de calcium dans l'océan comme les Ptéropodes sont très sensibles au pH de l'eau de mer et à l'augmentation de la pression partielle de  $CO_2$ . Ils montrent une croissance réduite et des signes de dissolution précoce lors que le pH baisse très légèrement et que la pression partielle de  $CO_2$  augmente. Quelle pourrait-être la conséquence de cette observation à l'échelle globale si elle devait s'appliquer à l'ensemble des organismes sécréteurs de calcaire ?
7. Compte tenu des résultats que vous avez trouvés plus haut, faites un bilan du carbone anthropogénique libéré par les activités humaines (combustion de matières fossiles et fabrication des ciments, déforestation), entre la quantité émise, la quantité qui s'est accumulée dans l'atmosphère et la quantité séquestrée par l'océan. Où peut être le carbone manquant ?

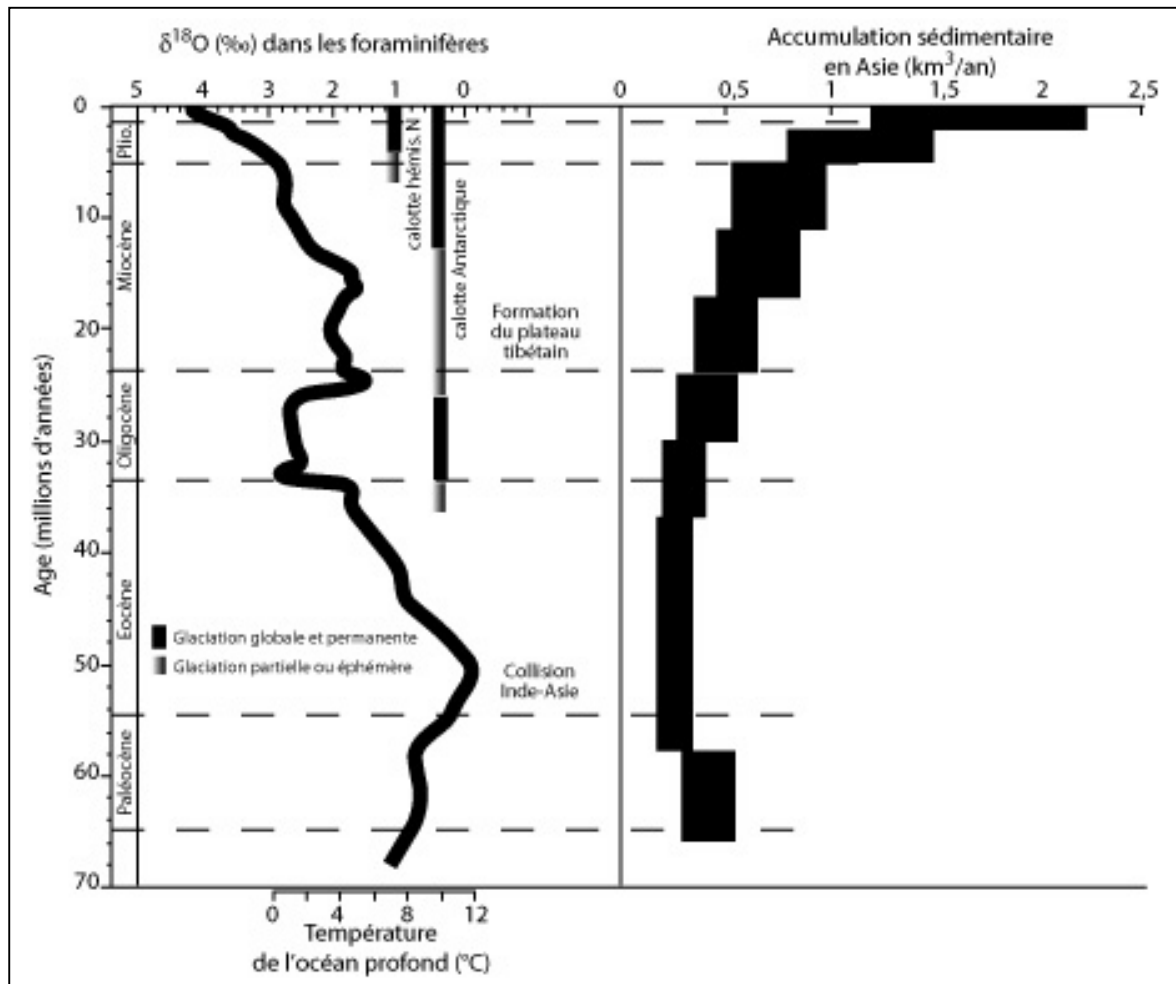
**Figure 1**

Caractéristiques d'un sol californien développé sur sable granitique depuis 50000 ans. Les croix désignent la zone non altérée.



**Figure 2**

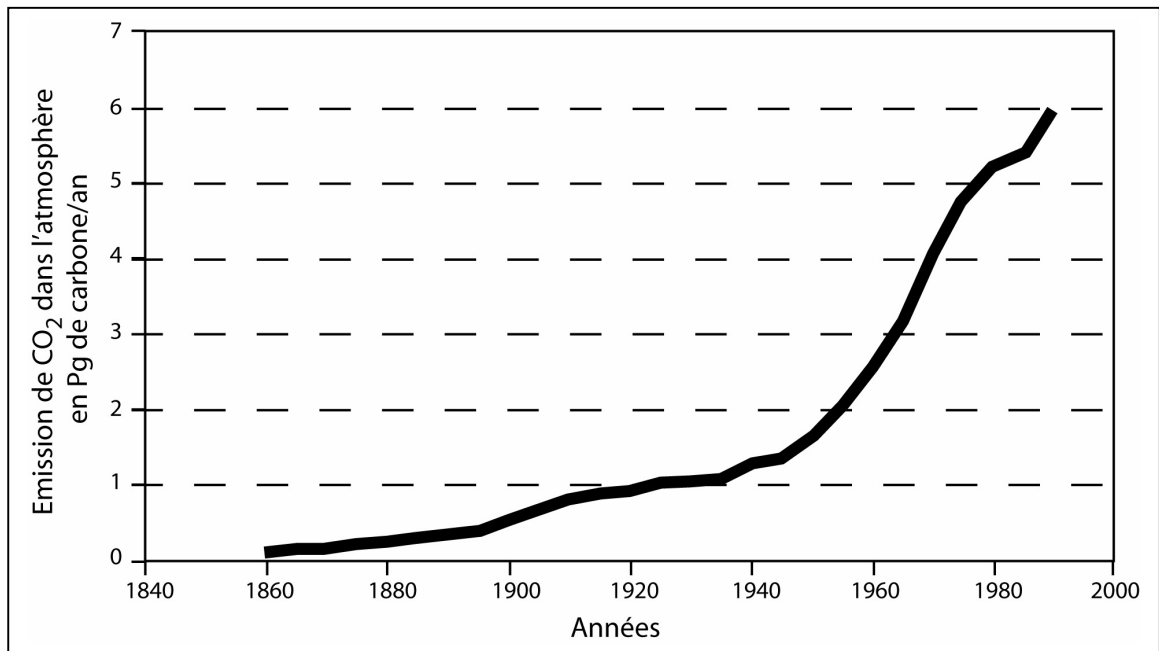
Évolution du rapport isotopique de l'oxygène des coquilles de Foraminifères benthiques depuis la limite Crétacé – Tertiaire, traduit également en température des eaux profondes de l'océan. Quelques événements climatiques et tectoniques majeurs sont indiqués. À droite, la courbe donnant la masse de sédiments accumulés dans les bassins sédimentaires asiatiques sur la même période.





**Figure 3**

Évolution de la quantité de carbone injectée dans l'atmosphère par la combustion des matières organiques fossiles depuis la première révolution industrielle, en Pg de carbone par an (Pg =  $10^{15}$ g)



**Figure 4**

Invasion du carbone anthropogénique dans l'océan. A : quantité moyenne de carbone intégrée sur une verticale. B et C : concentrations de carbone anthropogénique le long de deux sections (atlantique B, pacifique C) représentatives.

