
EPREUVE ECRITE DE SCIENCES DE LA TERRE
ENS : PARIS - LYON - CACHAN

Durée : 3 h Coefficients : PARIS 3 - LYON 3 - CACHAN 2

MEMBRES DE JURYS : D. CUNY, I. DANIEL, F. METIVIER , M. TARDY, G. VIDAL

Remarques générales :

Bien qu'il ait été précisé en préambule, que la qualité de la rédaction, et la concision des réponses seraient prises en compte dans l'évaluation, nous avons été confrontés à de trop nombreuses copies d'une vingtaine de pages environ, contenant peu de résultats. Nous insistons sur la nécessité d'accorder un minimum de soin à l'orthographe.

Nous déplorons également l'absence quasi-générale des calculs littéraux préalablement à l'application numérique. Cela conduit de trop nombreux candidats à des bricolages de chiffres inutiles.

Pour certains candidats, le C ne peut exister que sous forme organique. Il apparaît inconcevable qu'il existe sous forme minérale. On peut se demander si ces derniers ont lu le sujet dans sa globalité avant de commencer à composer.

Dans certaines copies, les candidats ont passé au moins 5 minutes à la rédaction d'une introduction générale au sujet. Ceci est inutile, et a souvent été l'occasion d'erreurs supplémentaires.

PREMIÈRE PARTIE : Bilan du carbone dans le manteau terrestre

1. Flux de carbone sortant du manteau au niveau des zones d'expansion océanique

a. La définition des laves émises au niveau des zones d'expansion océaniques, ainsi que la présentation de leurs caractéristiques physico-chimiques, ont donné lieu à des exposés très surprenants, même si les basaltes tholéitiques ont été reconnus dans la plupart des copies. Les étudiants connaissent mal la composition chimique d'un basalte tholéitique, et ignorent tout de ses propriétés physiques.

- Tout d'abord, les caractéristiques physico-chimiques ne sont pas synonymes de caractéristiques pétrographiques. Une composition minéralogique notamment n'est pas une composition chimique.
- Pour la plupart des étudiants, le caractère chimique dominant des basaltes médio-océaniques est leur richesse en Na ! Ces laves contiennent des micas dans bien des copies.
- Souvent les MORB sont décrits comme des roches acides, indiquant probablement que les termes de basique et acide sont mal compris.
- La viscosité des MORB lors de leur mise en place (10^2 Pa s^{-1} à $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) n'a été donnée dans aucune copie, et souvent les candidats indiquent que les MORB sont caractérisés par une viscosité élevée, supérieure à celle des andésites...
- Ne parlons pas des laves plutoniques, des minéraux qui sont inclus dans une matrice 'verreuse', des MORB = Mid Oceanic Rich Basalt, = Mid Oceanic Reference Basalt, des basaltes qui sont de couleur noire à cause de leur richesse en matière carbonée, des basaltes à quartz,...

b. Des exposés d'une longueur comprise entre quelques lignes et une page n'ont permis qu'à quelques candidats de justifier de façon logique pourquoi les échantillons les plus riches devaient être utilisés pour calculer le flux de C sortant du manteau, et comment la pauvreté en C de la plupart des laves s'explique.

- La solubilité des gaz augmentant en fonction de la pression, il y a probablement eu dégazage du CO₂ lors de l'ascension du magma pour la plupart des échantillons. Il faut donc prendre les échantillons qui ont la teneur en CO₂ la plus élevée, pour obtenir une composition chimique qui reflète celle du basalte lors de son extraction du manteau.
- Pour un certain nombre de candidats, on utilise des roches riches en C, afin de faciliter les mesures.

c. Très peu de candidats ont calculé correctement le volume et la masse de croûte océanique formés annuellement. En effet, la vitesse d'expansion doit être comptée deux fois pour calculer le flux (une fois pour chaque côté de la ride). Cela apparaît clairement si on fait un petit schéma, dont on ne rappellera jamais assez l'utilité. Par ailleurs, la valeur numérique donnée ne pouvait correspondre à la vitesse moyenne d'ouverture des océans, mais seulement à la vitesse d'expansion.

$$V_{\text{co}} = L_{\text{dorsales}} V_{\text{expansion}} H \\ = 6 \cdot 10^7 \times (5 \times 2) \cdot 10^{-2} \times 5 \cdot 10^3 = 3 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$$

$$M_{\text{co}} = V_{\text{co}} \rho_{\text{co}} \\ = 3 \cdot 10^{10} \times 2900 = 8.7 \cdot 10^{13} \text{ kg}$$

d. *Calcul du flux de carbone sortant du manteau (F⁻).*

$$F^- = M_{\text{co}} [\text{CO}_2] \\ = 8.7 \cdot 10^{13} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 3.5 \cdot 10^{11} \text{ kg a}^{-1}$$

F⁻ serait environ 25 fois plus petit, si l'on utilisait la teneur moyenne en C des laves au lieu de la teneur maximale observée.

2. Flux de carbone entrant dans le manteau

A l'instar de presque tous les cycles géochimiques, les zones de subduction constituent le lieu privilégié d'échanges de matière depuis les enveloppes superficielles vers le manteau (Fig. 1)

- La confusion entre croûte et lithosphère était malheureusement présente dans bon nombre de copies.
- Nous nous permettons de rappeler que la lithosphère subductée ne fond pas, sauf dans des contextes très particuliers.
- Très peu de candidats ont pensé à souligner la présence de sédiments carbonatés dans la lithosphère plongeante, et à établir une analogie entre la décarbonatation et la déshydratation qu'il connaissent puisqu'elle était indiquée dans beaucoup de copies.
- Il est très surprenant d'observer sur de très nombreux schémas que les sédiments des plaques en subduction sont transportés dans des dépressions crustales symbolisées par de petits wagonnets. Quelle en est la signification ?

3. Le carbone dans le manteau terrestre

a. Presque tous les candidats ont cité comme preuve de l'existence de C dans le manteau les popping rocks, sans même prendre la peine de justifier leur réponse. Il est clair qu'une évidence directe autre était attendue. Par exemple, l'existence même des diamants.

b. *Calcul de la teneur en C du manteau supérieur C_M .*

$$C_M = f C_L \\ = 0,12 \cdot 4000 = 480 \text{ ppm}$$

c. *Calcul de la teneur en carbone du manteau C_M en fonction de C_L , D et F .*

Bien que les définitions et la méthode étaient données, bon nombre de candidats n'ont pas su calculer C_M dans ce cas.

$$C_M = C_L (f + (1-f)D) \\ = 4000 (0,12 + 0,88 \cdot 0,005) = 498 \text{ ppm}$$

L'erreur commise est de 3.6%, mais probablement en deçà des barres d'erreurs sur les flux.

Nous avons également constaté à partir de cette question que 90% des candidats ne savent pas calculer une erreur.

d. *Calcul de la masse de carbone contenue dans le manteau supérieur terrestre.*

A l'occasion d'une question simple, il est surprenant de constater que de très nombreux candidats (1) ne savent pas calculer le volume d'une sphère, (2) ne connaissent pas le rayon de la Terre, (3) et encore moins la distinction entre manteau supérieur et inférieur, à moins qu'il ne s'agisse d'une erreur de lecture ou d'interprétation.

$$M_C = \frac{4}{3} \pi ((R_T - Z_C)^3 - (R_T - Z_{670})^3) \rho_M C_M = 5.1 \cdot 10^{20} \text{ kg}$$

e. *Calcul du temps de résidence d'un atome de carbone dans le manteau supérieur.*

Malgré la définition, tous les candidats n'ont pas réussi à formaliser la définition.

$$\tau_M = M_C / F^- = 3 \text{ Ga}$$

Ce temps de résidence est très long, comparable en ordre de grandeur à l'âge de la Terre.

DEUXIÈME PARTIE : Le carbone dans les enveloppes superficielles de la Terre, le puits océanique

1. *Cycle atmosphérique du carbone.*

Les flux entrants sont actuellement légèrement supérieurs à ceux sortants ; le cycle proposé n'est donc plus à l'état stationnaire, à cause des productions anthropiques.

2. *Temps de résidence d'un atome de carbone dans l'atmosphère.*

$$\tau_A = C_A / (F^+ + F^-) / 2 \\ = 750 \cdot 2 / (90 + 92 + 50 + 50 + 100 + 2 + 2 + 5.5) = 3.8 \text{ a actuellement.} \\ = 600 / (100 + 74) = 3.4 \text{ a avant industrialisation.}$$

Le cycle atmosphérique est donc quasi-instantané à l'échelle des temps géologiques ; 9 ordres de grandeur séparent les temps de résidence dans les réservoirs mantellique et atmosphérique.

3. *Concentrations en hydrogénocarbonate dissous des eaux océaniques.*

$$[\text{HCO}_3^-] = K_a [\text{H}_2\text{CO}_3] / [\text{H}^+] = K_a K_H p\text{CO}_2 / [\text{H}^+] \\ = 5.7 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1} \text{ avant industrialisation et } 7.1 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1} \text{ actuellement}$$

4. *Masse de carbone dissoute dans les eaux superficielles actuellement et avant l'industrialisation.*

$$\begin{aligned} M_c &= M_C S_{oc} H_{oc} [HCO_3^-] \\ &= 1226 \text{ Gt actuellement} \\ &= 997 \text{ Gt avant industrialisation} \end{aligned}$$

De nombreux candidats n'ont pas lu assez attentivement l'énoncé et ont calculé la masse d'hydrogénocarbonates et non la masse de carbone dissoute dans les océans.

5. *Commentaire des flux à la lumière de la figure 1.*

• Nous déplorons que dans quelques copies, le résultat numérique flux/an (exact) ait été ostensiblement modifié pour reproduire exactement le chiffre de la figure 1. Nous rappelons donc que l'honnêteté intellectuelle est une qualité indispensable.

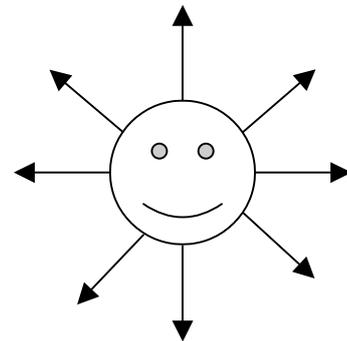
Le flux net de C absorbé par les eaux océaniques superficielles est de 2 Gt a^{-1} , soit 260 Gt pendant 130 a, si l'on considère ce flux comme constant. Ce résultat est en bon accord avec les valeurs calculées ci-dessus, surtout si l'on considère que la valeur de $+2 \text{ Gt a}^{-1}$ est un maximum.

Pourtant, le réservoir des eaux superficielles a à peine augmenté depuis l'industrialisation. Ce résultat indique que l'excès de CO_2 qui a été absorbé par les eaux superficielles n'y est pas resté, mais a déjà été absorbé par un ou d'autres réservoirs. On peut donc dire que la concentration en 'carbonate' des eaux superficielles est tamponnée essentiellement par les eaux profondes.

TROISIÈME PARTIE : L'effet de serre sur les planètes telluriques, Vénus et la Terre

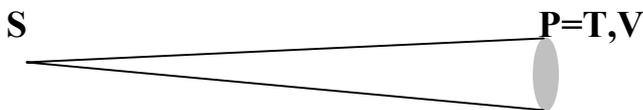
1. *Luminosité L émise par le soleil.*

$$\begin{aligned} L &= 4 \pi R_S^2 \sigma T^4 \\ &= 4 \pi (6.9 \cdot 10^8)^2 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 5790^4 = 3.81 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$



2. *Énergie incidente E_i reçue par la Terre et Vénus.*

• La vitesse de la lumière a été introduite dans ce calcul par de nombreux candidats, dans une formule inconnue...



$$\begin{aligned} E_i &= L / (4 \pi d_{S-P}^2) * (\pi R_P^2) \\ E_{iT} &= 3.81 \cdot 10^{26} / (4 \pi (149.6 \cdot 10^6)^2) (\pi 6380^2) = 1.73 \cdot 10^{17} \text{ W} \\ E_{iV} &= 3.81 \cdot 10^{26} / (4 \pi (108.2 \cdot 10^6)^2) (\pi 6051^2) = 2.98 \cdot 10^{17} \text{ W} \end{aligned}$$

3. *Énergie solaire E_a effectivement absorbée par ces deux planètes.*

• 90% des candidats, au moins, ne connaissent pas la définition de l'Albédo.

$$\begin{aligned} E_a &= E_i (1-A) \\ E_{aT} &= 1.73 \cdot 10^{17} (1-0.3) = 1.21 \cdot 10^{17} \text{ W} \\ E_{aV} &= 2.98 \cdot 10^{17} (1-0.65) = 1.04 \cdot 10^{17} \text{ W} \end{aligned}$$

4. Température d'équilibre T_e de la Terre et de Vénus.

À l'équilibre, $E_a = 4 \pi R_p^2 \sigma T_e^4$,

Soit $T_e = (E_a / 4 \pi R_p^2 \sigma)^{1/4}$

$T_{eT} = (1.21 \cdot 10^{17} / 4 \pi (6380 \cdot 10^3)^2 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 254 \text{ K}$

$T_{eV} = (1.04 \cdot 10^{17} / 4 \pi (6051 \cdot 10^3)^2 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8})^{1/4} = 251 \text{ K}$

5. Comparaison des températures d'équilibre avec les températures moyennes de surface.

• Les commentaires sur la température des planètes ont nettement démontré le manque de recul des candidats face à des résultats numériques parfois aberrants.

Pour la Terre, T_{eT} est de -19 °C au lieu de $+13 \text{ C}$, 32 °C d'écart. La cause en est l'effet de serre, assuré essentiellement par H_2O et CO_2 . Il permet de maintenir l'eau dans ses trois états à la surface de la planète.

Pour Vénus, T_{eV} est de -22 °C , au lieu de $+477 \text{ °C}$, soit 499 °C d'écart.

L'origine est à rechercher dans le très fort effet de serre sur Vénus, du à une atmosphère dense (pression au sol de 90 bar), constituée à 98,1% de CO_2 .

QUATRIÈME PARTIE : Répartition des sédiments carbonatés

Commentaire de la carte de répartition des sédiments carbonatés à la surface de la planète.

• Cette question a été la plus mal traitée, par tous les candidats. Nous n'avons rencontré de *description* pertinente des informations contenues dans sur cette carte, que dans quelques très rares copies.

• Le terme de sédiment océanogène était présent dans un tiers des copies. Que signifie-t-il ? S'oppose-t-il à l'adjectif terrigène ?

• Les exposés des candidats révèlent nettement que la plupart d'entre eux ne conçoivent pas d'autre mode de vie que la vie benthique. Ignorant l'existence de la vie pélagique, ils expliquent ainsi l'absence de sédimentation carbonatée dans les plaines abyssales.

• Le fonctionnement des dorsales ne réchauffe pas l'océan pour ainsi accroître la productivité planctonique, pas plus que l'hydrothermalisme n'est responsable de l'activité planctonique (benthique ?).

• L'argile ne peut pas provenir de l'altération des carbonates, comme indiqué dans certaines copies.

• Les notions de CCD et de lysocline sont inconnues de la plupart des candidats.

Les sédiments calcaires biogènes sont essentiellement localisés sur les hauts fonds océaniques (dorsales, rides asismiques, plateaux sous-marins) au dessus de la lysocline.

L'extension longitudinale de la zone de sédiments calcaires permet d'ailleurs d'observer le bombement thermique, large, au niveau de la dorsale Pacifique rapide. La zone est beaucoup plus restreinte au niveau de la dorsale medio-Atlantique.

Les boues calcaires argileuses contenant moins de 60% de carbonate de calcium, occupent toutes les zones situées entre la profondeur de compensation des carbonates et les hauts reliefs sous-marins. On peut ainsi observer la différence de profondeur de la CCD entre les océans Atlantique et Pacifique dans lequel la profondeur de la CCD est plus faible. En effet, dans l'Atlantique les eaux profondes sont alimentées par des eaux de surface oxygénées et pauvres en CO_2 , qui plongent dans l'océan Arctique; la profondeur moyenne de la CCD y est de 5000 m. En revanche, les eaux profondes du Pacifiques sont plus riches en CO_2 ; la profondeur moyenne de la CCD y est de 4300

m. L'équilibre $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ est déplacé dans le sens de la dissolution des carbonates.

On observe sur cette carte les zones de très forte productivité, comme la ceinture équatoriale (surtout visible dans le Pacifique). Dans cette bande latitudinale, la CCD n'est presque jamais franchie ; les apports compensent en effet presque toujours la dissolution. A l'inverse, on distingue nettement les embouchures des grands fleuves où la teneur en carbonate des sédiments devient négligeable par dilution dans une importante fraction détritique (Saint-Laurent, Mississippi, Amazone, Niger, Zaïre, Gange-Brahmapoutre, etc...).

Manquait volontairement dans cette représentation les plateformes carbonatées péri-continentales ; et très peu de candidats s'en sont aperçus.

CINQUIEME PARTIE : Cycle global du carbone

Cette question de synthèse nécessitait de replacer l'ensemble des informations acquises au cours du problème dans un cycle géodynamique.

- Beaucoup de candidats se sont contentés de recopier la figure 1, en y ajoutant la boîte du réservoir mantellique.
- Nous avons volontairement omis le rôle des points chaud dans le cycle du C ; seuls quelques candidats y ont pensé.
- L'effet de serre était en général absent.
- En revanche, l'importance du carbone organique a presque toujours été correctement mentionnée.

Nous avons précisé dans la figure 1 ci-dessous la partie du cycle du carbone, qui manquait très souvent dans les copies.

CYCLE GLOBAL du CO₂

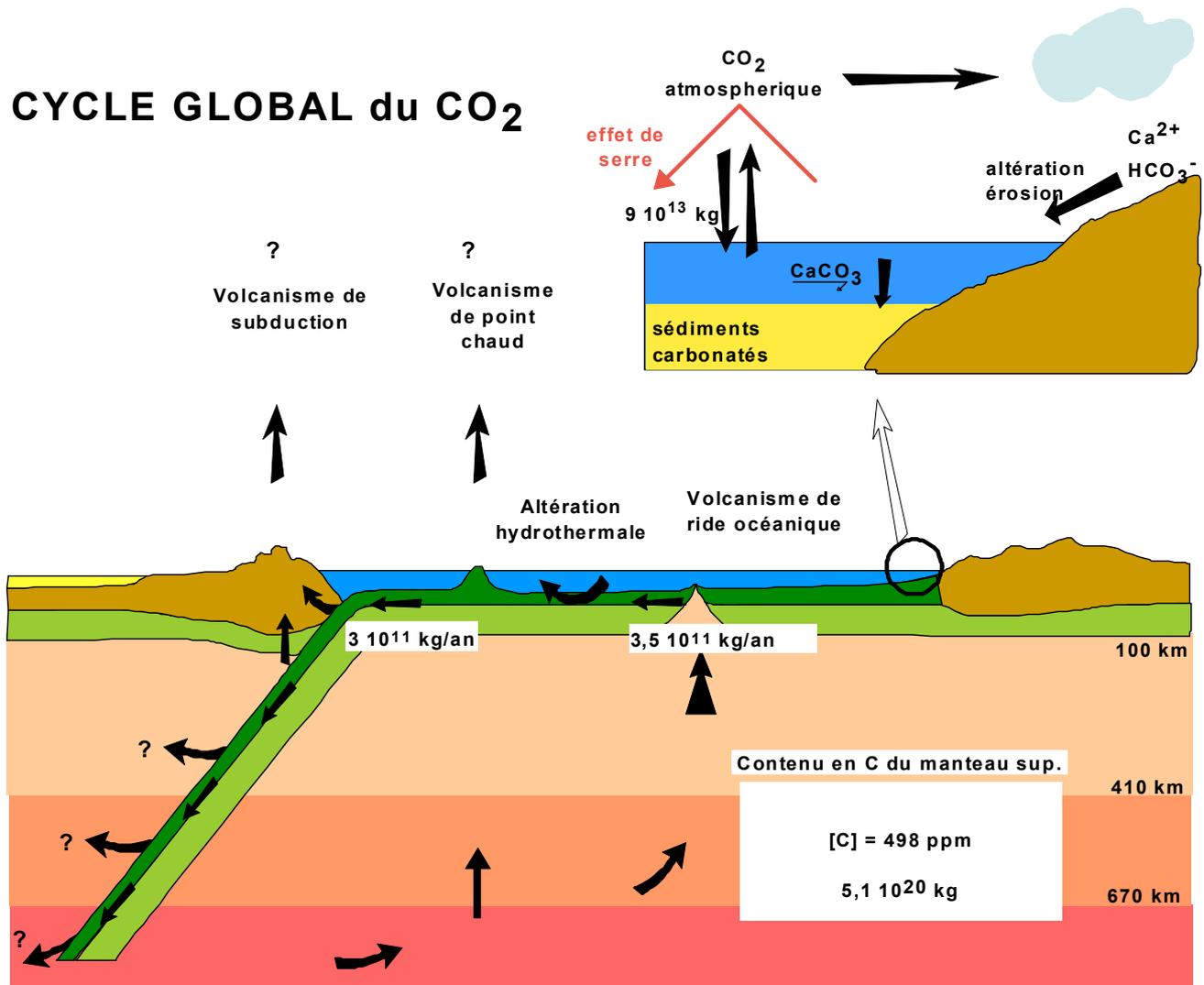


Figure 1 : cycle géodynamique global du carbone