

ULC 233

J. 2041

SESSION 2002

Filière BCPST

SCIENCES DE LA TERRE

(Epreuve commune aux ENS de Paris, Lyon et Cachan)

Durée : 3 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.

Tournez la page S.V.P.

PRÉAMBULE

s 1, 2, 3, 4 sont indépendants.

ompte de la qualité de la rédaction et de la concision d

*tion massique c_i d'un élément chimique ou d'un compo
var la masse d'élément ou de composé par unité de mas:
s problèmes posés, le manteau terrestre est consid
ogène et la contribution de la croûte aux bilans de ma
ns. $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pascal}$*

Masses et rayons

Terre $M_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

manteau terrestre $M_m = 4 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

croûte terrestre $M_c = 2 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Terre $R_T = 6371 \text{ kilomètres (km)}$

rayon $R_c = 6052 \text{ kilomètres (km)}$

Table 1 : Production de chaleur d'origine radioactive

Élément i	K	U	Th
q_i (W.kg ⁻¹)	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$

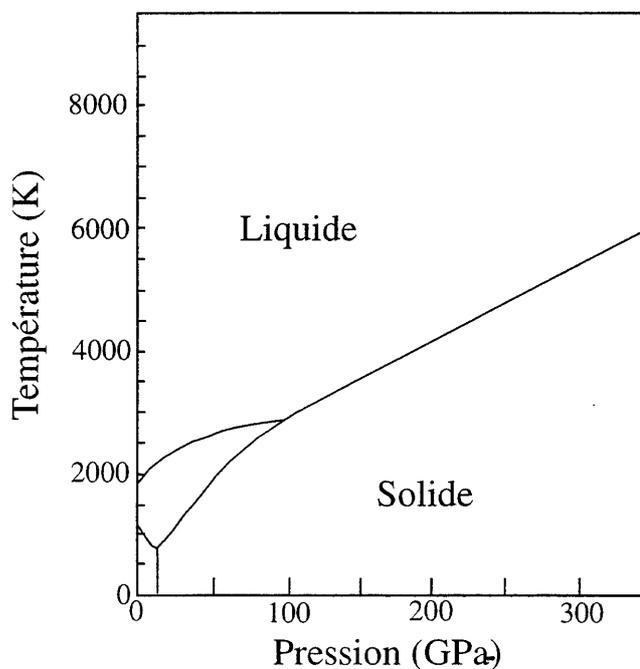
Note sur la table 1 : Les valeurs q_i pour l'élément i (i : potassium (K), uranium (U), thorium (Th)) sont données en unités de puissance par unité de masse de l'élément

Table 2 : Noyau terrestre : données géophysiques

Profondeur (km)	Pression (GPa)	Température (K)	Accélération de la pesanteur (m.s ⁻²)	Masse volumique (kg.m ⁻³)
2900	136	4500 (± 500)	10,7	9900
5150 (côté liquide)	329	6000 (± 1000)	4,4	12170
5150 côté solide	329	6000 (± 1000)	4,4	12760

Note sur la table 2 : La masse volumique moyenne à 5150 kilomètres de profondeur sera prise égale à 12500 kg.m⁻³.

Figure 1 : Diagramme de phases du fer.



Tournez la page S.V.P.

Problème 1. Théorie du vernis tardif

La formation du noyau se fait par migration du métal vers le centre de la Terre. Au cours de ce trajet, certains éléments dits très sidérophiles se concentrent fortement dans la phase métallique au détriment des minéraux silicatés du manteau et de la croûte. On constate alors une contradiction entre les abondances de ces éléments prévues par les expériences de laboratoire et celles effectivement mesurées dans le manteau terrestre. Une hypothèse pour expliquer cette différence fait intervenir un apport, postérieur à la fin de la différenciation du noyau, de matériaux de composition chondritique particulière: le **vernis tardif**. Ce vernis se mélange avec les parties rocheuses de la Terre, manteau et croûte, tandis que ses composants les plus volatils rejoignent les enveloppes externes. Le but de ce problème est d'estimer les masses de ce vernis tardif et de ses apports en eau et carbone à la Terre primitive.

a.

Les concentrations massiques d'iridium et de platine mesurées dans le manteau sont :

$c_{ir}^m = 3,2 \cdot 10^{-9}$ et $c_{pt}^m = 6,6 \cdot 10^{-9}$. Dans quelles roches a-t-on pu effectuer ces analyses?

Citez leurs minéraux principaux. Mentionnez un contexte géologique où de telles roches affleurent.

b.

L'analyse de météorites primitives ressemblant au matériau à partir duquel s'est formée la Terre permet de déduire que les concentrations massiques d'iridium et de platine dans la Terre totale sont : $c_{ir}^T = 480 \cdot 10^{-9}$ et $c_{pt}^T = 990 \cdot 10^{-9}$. Par ailleurs le coefficient de distribution d'un élément i entre métal et silicate est défini par : $D_i = c_i^{metal}/c_i^{silicat}$. Des expériences de laboratoire ont montré que $D_{ir} = 10^{10}$ et $D_{pt} = 10^7$ et que ces valeurs dépendent peu de la température, de la pression et de la composition du système. Calculez les valeurs de c_{ir}^m , c_{pt}^m et c_{ir}^m/c_{pt}^m que l'on obtiendrait dans l'hypothèse d'un équilibre chimique entre métal du noyau et silicates du manteau.

c.

Montrez que le rapport c_{ir}^m/c_{pt}^m effectivement mesuré dans le manteau est correctement expliqué par la théorie du vernis tardif.

On considèrera que les concentrations massiques d'iridium et de platine présentes dans les objets constituant le vernis tardif sont égales à leurs valeurs dans la Terre totale.

d.

Calculez la masse M_v du vernis tardif permettant d'expliquer les valeurs de c_{ir}^m et c_{pt}^m effectivement mesurées dans le manteau. Estimez les masses d'eau et de carbone ainsi apportées sur Terre. On donne les concentrations massiques en eau et en carbone dans les chondrites représentatives du vernis tardif : $c_{eau}^v = 0,1$ $c_C^v = 0,006$

e.

En supposant constant dans le système solaire interne primitif le flux d'objets chondritiques à l'origine du vernis tardif, estimez quelles masses d'eau et de carbone ont été apportés par ce moyen à la planète Vénus.

f.

Le carbone du vernis tardif se transforme totalement en CO_2 sur les planètes où il s'accrète. Expliquez qualitativement ce que sont devenues ces grandes quantités de CO_2 sur Terre? Et sur Vénus? Pour comparaison, on donne la masse de carbone dans l'atmosphère terrestre : $7,2 \cdot 10^{14}$ kg et dans l'atmosphère de Vénus : $1,25 \cdot 10^{20}$ kg.

Problème 2. Évolution du CO₂ atmosphérique par altération des roches

- a.
Quelle est l'influence du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique sur l'altération des silicates des roches? Dans la suite de ce problème, on se propose d'évaluer quantitativement cette influence à partir de l'analyse de la composition des rivières.
- b.
Montrez que la réaction chimique d'altération des silicates par l'eau et en présence de CO₂ consomme une mole de CO₂ atmosphérique par mole d'ion HCO₃⁻ produite dans l'eau. On prendra l'exemple d'un minéral de formule CaAl₂Si₂O₈ en considérant que le calcium passe sous forme d'ion dans l'eau tandis que le silicium et l'aluminium forment des oxydes SiO₂ et Al₂O₃.
- c.
On considère un réseau hydrographique altérant exclusivement des roches basaltiques. Où sur Terre pourrait on rencontrer un tel système? Quelles sont l'origine et les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des basaltes?
- d.
Le rapport d/S du débit total (d) d'eau sortant de ce réseau hydrographique sur la surface du bassin drainé (S) est $d/S = 450 \text{ mm.an}^{-1}$. L'analyse de la rivière principale révèle une concentration molaire de HCO₃⁻ de $c = 3 \cdot 10^{-3} \text{ mol.l}^{-1}$. Calculez la quantité annuelle par unité de surface, u, de CO₂ soustrait à l'atmosphère par l'altération des silicates dans ce réseau (la quantité u sera exprimée en mol.km⁻².an⁻¹).
- e.
Que deviennent les ions HCO₃⁻ transportés par la rivière lorsqu'ils parviennent à l'océan?
- f.
Représentez en coupe les fonds océaniques depuis la limite du continent émergé jusqu'à la ride. Représentez alors une répartition plausible des sédiments carbonatés sur ces fonds océaniques. Discutez qualitativement l'effet de la pression sur la réaction de dissolution de la calcite : $\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$. On donne son volume molaire de réaction $\Delta_r V = -37 \text{ cm}^3$ supposé indépendant de la pression et de la température.
- g.
La réaction prépondérante de précipitation de calcite dans l'océan s'écrit:
$$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
Résumez l'histoire d'un atome de carbone initialement présent dans une molécule de CO₂ atmosphérique impliquée dans une réaction chimique d'altération des silicates sur un continent. En supposant que la majorité des carbonates formés dans l'océan échappe à la dissolution, calculez la valeur effective de u corrigée de la précipitation des carbonates dans l'océan.

Tournez la page S.V.P.

h.

L'intégration de ce processus sur l'ensemble des systèmes hydrographiques mondiaux donne une valeur de $5 \cdot 10^{12} \text{ mol.an}^{-1}$ de consommation de CO_2 atmosphérique pour une température moyenne de 20°C . Pourquoi ne peut-on pas simplement obtenir cette valeur en multipliant la valeur de u par l'aire de la surface de la Terre? Calculez le temps τ nécessaire pour transformer en carbonates, par ce mécanisme, une quantité de CO_2 correspondant à $2,66 \cdot 10^{20} \text{ kg}$ de carbone. Commentez.

i.

Calculez τ à une température de 90°C . Commentez.

On donne l'énergie d'activation apparente du processus d'altération chimique des silicates : 42 kJ mol^{-1} . Cette valeur est supposée indépendante de la température et de la composition. La constante des gaz parfaits est $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}$.

Problème 3 : Refroidissement de la Terre interne

a.

Expliquez avec concision la relation existant entre l'activité géologique de la planète Terre et la radioactivité. Existe-t-il d'autres sources de chaleur importantes dans la Terre interne? Commentez leur importance relative par rapport à la radioactivité.

b.

L'analyse de météorites primitives, ressemblant au matériau à partir duquel s'est formée la Terre, permet de déduire que les concentrations massiques en uranium (U) et en thorium (Th) dans la Terre totale sont $c_U^T = 8 \cdot 10^{-9}$ et $c_{Th}^T = 29 \cdot 10^{-9}$. De plus, le rapport des concentrations massiques de potassium (K) et d'uranium dans la Terre totale vaut: $c_K^T/c_U^T = 5720$. En utilisant les valeurs données dans la table 1, calculez les quantités de chaleur Q'_K , Q'_U , Q'_{Th} , et Q'_{int} produites dans la Terre par unité de temps respectivement par chacun des éléments K, U, Th et par les trois réunis.

c.

Proposez une méthode utilisant la loi de Fourier permettant de mesurer le flux de chaleur Φ à la surface de la Terre.

d.

On mesure à la surface de la Terre un flux de chaleur moyen $\Phi = 88 \cdot 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}$. Montrez que l'intérieur de la Terre se refroidit. On considèrera que toute la chaleur produite actuellement dans l'intérieur de la Terre provient des radioactivités de K, U et Th.

e.

Montrez que ce taux de refroidissement est d'environ 120 K.Ga^{-1} . On donne la capacité calorifique moyenne par unité de masse des matériaux terrestres $c = 1200 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. Où sur Terre devrait-on rechercher des évidences géologiques d'un tel refroidissement?

f.

Parmi les éléments majeurs du manteau terrestre, lequel est le moins transféré vers les magmas basaltiques lors de la fusion partielle du manteau? Quelle caractéristique chimique de laves permettrait alors de mettre en évidence le refroidissement de la Terre interne? Ces laves existent-elles?

Problème 4. Conséquences du refroidissement de la Terre interne pour le noyau

Dans ce problème, on supposera que le noyau terrestre est constitué de fer pur.

a.

Rappelez les preuves de la sismologie indiquant la présence d'un noyau liquide entre 2900 et 5150 km de profondeur.

b.

Qu'est ce que le gradient géothermique ? Donnez une estimation du gradient géothermique dans le noyau en utilisant les données de la table 2.

c.

Par quelles méthodes expérimentales a-t-on pu établir le diagramme de phases du fer (figure 1)?

d.

Expliquez l'existence d'un noyau solide au centre de la Terre en utilisant à la fois le diagramme de phases du fer et l'estimation du gradient géothermique dans le noyau. Quelle est la conséquence du refroidissement de la Terre interne sur la position de l'interface entre noyau liquide et noyau solide?

On utilisera un schéma pour appuyer ces raisonnements.

e.

Estimez l'élévation de pression par kilomètre de profondeur au niveau de l'interface entre noyau liquide et noyau solide.

On supposera vérifiée la condition d'équilibre hydrostatique.

f.

En utilisant une valeur de refroidissement de la Terre interne de 120 K.Ga^{-1} et le diagramme de phases du fer de la figure 1, montrez que la vitesse de variation du rayon du noyau solide est d'environ 170 km.Ga^{-1} . Si cette vitesse est restée constante, quel est l'âge du noyau solide ? Commentez.

g.

À partir du diagramme de phases du fer et de données de la table 2, estimez l'entropie massique $\Delta_s S$ de la réaction de cristallisation du fer au niveau de l'interface entre noyau liquide et noyau solide. Calculez l'enthalpie massique (notée L) de cette réaction au niveau de cette interface. *On appliquera la formule de Clapeyron.*

h.

Calculez la quantité de chaleur Q'_n libérée par unité de temps par la cristallisation du noyau solide. Citez une conséquence géophysique majeure possible de cette libération de chaleur.

FIN