

10.25B

SESSION 2010

Filière BCPST

SCIENCES DE LA TERRE

Epreuve commune aux ENS de Paris, Lyon et Cachan

Durée : 4 heures

Les calculatrices ne sont pas autorisées.

PRÉAMBULE

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

L'utilisation de la calculatrice est interdite.

PREMIÈRE PARTIE (durée 1h30)

Structure et composition de la Terre profonde

1. La structure du manteau révélée par la sismologie :

Les sismologues utilisent la propagation des ondes sismiques pour « imager » l'intérieur de la Terre. Les mesures de variations de vitesse des ondes avec la profondeur permettent notamment de définir des interfaces majeures à l'intérieur du globe.

- a. Quels sont les deux types d'onde de volume se propageant dans la Terre suite à un séisme ? Illustrez d'un schéma le mouvement des particules associé à ces deux types d'ondes. Donnez l'expression de la vitesse de ces ondes en fonction des propriétés du milieu (propriétés que vous définirez). Laquelle de ces deux ondes ne se propage pas dans les liquides, et pourquoi ?
- b. Expliquez à l'aide d'un schéma comment les lois de la réfraction optique permettent de mettre en évidence la présence d'une zone liquide (noyau externe) à l'intérieur de la Terre. Comment peut-on mettre en évidence la présence d'un noyau solide au centre de la Terre ?
- c. Expliquez à l'aide d'un diagramme pression-température la raison thermodynamique de la présence d'un noyau solide au cœur de la Terre là où il fait pourtant le plus chaud. Proposez une valeur de la température et de la pression au centre de la Terre.
- d. Le modèle de Terre radial dit « PREM » (Preliminary Reference Earth Model) donne les variations de vitesses sismiques moyennes à l'intérieur de la Terre. Depuis la base de la croûte jusqu'à la limite noyau-manteau, rappelez les profondeurs des interfaces caractérisées par une forte variation des vitesses sismiques, et donnez leur nom.
- e. Proposez une interprétation de ces discontinuités en faisant appel aux résultats des études expérimentales de minéralogie à haute pression et haute température.
- f. L'asthénosphère est une zone caractérisée par une faible vitesse de propagation des ondes sismiques. Proposez à l'aide d'un diagramme profondeur-température une interprétation de cette caractéristique.
- g. La figure 1 est une image de tomographie sismique montrant l'écrasement d'une lithosphère océanique à la limite entre le manteau supérieur et le manteau inférieur. Rappelez les principes de la tomographie sismique. À quoi correspond l'échelle de couleur sur ce type de figure ? Expliquez pourquoi le changement de phase se produisant à la limite entre les deux manteaux est de nature à ralentir - voire à empêcher dans certains cas - le passage des plaques en subduction.

2. La composition chimique de la Terre :

a. Donnez les principaux minéraux composant une péridotite de type Lherzolite et leur composition chimique. Quelle est la différence de composition minéralogique entre une Harzburgite et une péridotite de type Lherzolite ; à quel phénomène est-elle due ?

b. Un des indices des variations de composition de la Terre avec la profondeur est la différence entre la densité des roches échantillonnées en surface et la densité moyenne de la planète. Pour obtenir la densité moyenne de la Terre, on peut la « peser » en utilisant la Lune.

α. Rappelez l'expression de l'accélération centrifuge d'un corps en rotation.

β. En utilisant la seconde loi de Newton (principe fondamental de la dynamique) appliquée à la Lune en rotation autour de la Terre, donnez la vitesse de rotation de la Lune en fonction de la masse de la Terre, de la constante gravitationnelle G et de la distance Terre-Lune.

γ. En déduire une relation entre la période de rotation de la Lune et la masse de la Terre.

δ. Calculez à partir de cette relation la masse de la Terre et sa masse volumique moyenne. Comment se compare-t-elle à la masse volumique d'une péridotite ?

Données utiles au calcul : $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$, distance Terre-Lune = 384 400 km, période de révolution lunaire = 27,4 jours, $\{4\pi^2 \times 3,844^3 / 6,67 / (2,75 \times 3,6 \times 2,4)^2 = 0,6\}$.

c. La composition du noyau terrestre n'est accessible que de façon indirecte, notamment par l'étude des météorites et par l'utilisation de contraintes géophysiques.

α. Quel type de météorites suggère que le noyau terrestre est formé majoritairement d'un alliage de fer et de nickel ?

β. Quels arguments géophysiques permettent d'avancer que le noyau terrestre contient également entre 7 et 14% d'éléments légers (silicium, oxygène et/ou soufre) ?

d. Qu'est-ce qu'une chondrite ? Donnez le nom des différents types de chondrites que vous connaissez. Quel est l'âge du système solaire obtenu à partir des chondrites ?

e. Des arguments d'identité isotopique permettent d'apparenter certaines chondrites à la Terre. La figure 2 donne sur un diagramme $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$ la position de certaines chondrites repérées par des acronymes (EH, C1, L...), et la position de la droite sur laquelle se localisent des échantillons terrestres (droite de fractionnement terrestre en bleu).

α. Rappelez la définition du $\delta^{18}\text{O}$. Comment est-il mesuré ? Expliquez en vous appuyant sur un schéma comment évolue ce rapport dans la neige aux pôles en fonction de la température et de la quantité de glace stockée à la surface du globe.

β. Quel scénario de formation de la Lune peut expliquer sa position sur la droite de fractionnement terrestre ?

γ. Quel type de chondrite peut-être apparenté à la Terre d'après la figure ?

f. Les météorites apparentées à la Terre dans le diagramme précédent ne contiennent pas de fer oxydé (FeO), mais uniquement du fer sous forme métal (Fe). Certains modèles proposent que la différenciation planétaire à partir de ce type de matériel à haute pression et haute température, peut-être décrite sous la forme d'une équation d'échange qui couple le fer oxydé (FeO) produit dans le manteau au silicium dissous dans le noyau :



α. Pour une masse M_{FeO} de FeO formée dans le manteau, quelle est la masse M_{Si} de Si dissous dans le noyau d'après cette réaction ? (N.B. : on se contentera de donner une formule sans faire le calcul).

β. Pour un manteau contenant 7,6% en masse de FeO, quel est le pourcentage en masse de FeO dans la Terre totale ? (N.B. on se contentera de donner une formule sans faire le calcul).

γ. Déduire des deux questions précédentes le pourcentage en masse de Si dissous dans le noyau. (N.B. : faire l'application numérique).

δ. Si on prenait en compte la présence d'oxygène dissous dans le noyau via la réaction



comment changerait l'estimation de la quantité de Si dissoute dans le noyau ?

Données utiles au calcul : masse du noyau $\approx 33\%$ de la masse de la Terre, $M_{\text{O}} \approx 16$ g/mol, $M_{\text{Si}} \approx 28$ g/mol, $M_{\text{Fe}} \approx 56$ g/mol, $\{7,6 \times 6,7 \times 7/3,6/3,3=30\}$.

DEUXIÈME PARTIE (durée 1h30)

Dynamique et évolution de la lithosphère et de la croûte continentales

1. Formation de bassins intracontinentaux par subsidence thermique :

On trouve en Amérique du Nord des bassins sédimentaires de forme cylindrique, dont on peut expliquer l'origine par subsidence thermique dans le cadre général établi pour décrire le « rifting actif ».

a. À partir d'un ensemble de schémas, expliquez la formation d'un bassin sédimentaire par subsidence thermique suite à l'arrivée d'un panache mantellique sous la lithosphère.

b. On met en évidence par sondage géophysique sous les bassins intracratoniques Nord-Américains un manteau de densité anormale, supérieure à la densité du manteau adjacent.

α. Donnez la formule définissant l'anomalie de Bouguer, en expliquant la signification des différents termes introduits.

β. Quel est le signe de l'anomalie de Bouguer sous une chaîne de montagne, et que signifie-t-il ? Quel est le signe attendu dans le cas des bassins considérés ici ?

c. À partir des informations de la figure 3 réalisez un calcul d'équilibre isostatique pour obtenir la densité du manteau lithosphérique anormal sous le bassin.

d. Le coefficient de dilatation thermique est défini comme $\alpha = -1/\rho (d\rho/dT)$. En déduire l'expression de la masse volumique ρ en fonction de l'anomalie de température ΔT et de α (on introduira $\rho(\Delta T=0)=\rho_0$). En prenant $\rho_0=3200 \text{ kg m}^{-3}$ et $\alpha=2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, calculez l'anomalie de température minimale ΔT du manteau qui s'est mis en place dans la lithosphère, avant d'entraîner par son refroidissement la formation du bassin. (N.B. : On utilisera un développement limité pour ce calcul ; on donne $5/3,2=1,56$).

2. Altération de la croûte continentale :

Les reliefs continentaux résultent de l'interaction entre les forces tectoniques et les processus d'érosion.

a. Rappeler la composition minéralogique typique d'un granite.

b. En vous appuyant sur le diagramme de Hjulström, expliquez pourquoi l'érosion mécanique des roches s'accompagne d'un tri granulométrique.

c. À partir de l'exemple de l'orthose, illustrez l'influence du climat sur l'altération chimique.

b. Pourquoi l'eau de mer est-elle salée, et pourquoi est-elle riche en chlore par rapport à d'autres éléments chimiques ?

3. L'océan comme source d'énergie :

Parmi les éléments chimiques dissous dans l'océan, on trouve en moyenne $3,3 \cdot 10^{-6}$ g/kg d'uranium (la masse de l'océan est de $1,4 \cdot 10^{21}$ kg). La concentration en uranium dans l'eau de mer résulte du bilan entre les flux entrants et sortants d'uranium,

$$dC_U/dt = -kC_U + F_0$$

où kC_U est le flux d'uranium précipitant au fond de l'océan, et $F_0 = 14000$ t/an est le flux d'Uranium apporté par les fleuves.

a. Sachant que la concentration d'uranium est constante dans l'océan (état stationnaire), déterminez le coefficient k caractérisant l'efficacité de la précipitation de l'uranium, en kg/an (on donne $1,4/3,3 = 0,4242$).

b. On peut estimer que d'ici 100 ans la civilisation humaine consommera en moyenne $7 \cdot 10^{20}$ J par an. Sachant qu'un gramme d'uranium produit $7 \cdot 10^{10}$ J, quelle masse d'uranium devra-t-on utiliser pour couvrir ces besoins ?

c. On peut puiser l'uranium dans l'océan pour couvrir ces besoins. L'évolution de l'uranium dans l'océan s'écrit alors

$$dC_U/dt = -kC_U + F_0 - F_1$$

où F_1 est le flux d'uranium prélevé, en kg/an.

α . Donnez la solution de cette nouvelle équation d'évolution, en prenant comme condition initial $C_U(t=0) = C_0$ la concentration actuelle de l'uranium dans l'océan.

β . Cette solution tend-elle vers un nouveau régime permanent, si oui lequel ? (on donne $4/1,4 \times 3,3 = 9,43$)

4. Les glissements de terrain :

Les glissements de terrain sont un risque naturel important. En effet, s'ils représentent un aléa limité, ils se produisent très régulièrement, et sont associés souvent à une forte vulnérabilité.

a. On se propose de modéliser un écoulement gravitaire comme un glissement « en masse » d'un cube de roche de masse M et de côté R , qui se détache d'une hauteur H . Si le bloc de roche était ramené à un point matériel, quelles seraient sa vitesse et son énergie cinétique quand il touche le sol ?

b. Le bloc de roche va glisser à la surface du sol (que l'on considère plate et horizontale) jusqu'à avoir épuisé son énergie cinétique initiale. Cette énergie est consommée par les forces de frottements à la base du bloc, que l'on prendra comme proportionnelles en norme au poids du bloc (on introduit une constante de proportionnalité α).

α . Exprimez le travail des forces de frottement si le bloc a parcouru une distance L .

β . Estimez la distance maximale parcourue par le bloc. Qu'est-ce qui vous semble remarquable dans le résultat obtenu ?

TROISIÈME PARTIE (durée 45 minutes)

Une étude simplifiée du cycle du carbone

a. Réalisez un schéma illustrant le cycle du carbone, en mettant en évidence les grands réservoirs et en donnant les ordres de grandeurs des flux entre ces réservoirs.

b. Pour modéliser les variations des concentrations en carbone dans l'atmosphère (C_1) en fonction de différences forcages géologiques (volcanisme par exemple), on peut utiliser une équation d'évolution du type

$$\frac{dC_1}{dt} = a + b \sin(\omega t) - kC_1,$$

où $a = 48 \times 10^{15}$ g/an est le flux de carbone libéré par l'utilisation des combustibles fossiles et où $k = 0.1 \text{ an}^{-1}$ décrit l'efficacité de la photosynthèse. Le terme $b \sin(\omega t)$ représente un forçage géologique périodique de pulsation ω . On note C_0 la valeur de C_1 à $t=0$.

α . Sachant que la solution de l'équation (2) s'écrit sous la forme

$$C_1(t) = A + B \exp(-kt) + D \cos(\omega t) + E \sin(\omega t),$$

donnez l'expression de A, B, D et E. Lorsque t devient grand, comment peut être simplifiée la solution ? Peut-on définir un régime permanent ?

β . Quelle forme prend la solution simplifiée aux grands temps, pour des fréquences d'oscillations très petites, telles que $\omega \ll k$? Que peut-on dire alors de la variation des teneurs en Carbone dans l'atmosphère : ont-elles la même amplitude que le terme de forçage, sont-elles en phase avec lui ?

γ . Comment ces conclusions sont-elles modifiées pour le cas où la fréquence d'oscillation est grande, telle que $\omega \gg k$?

FIN DE L'ÉPREUVE

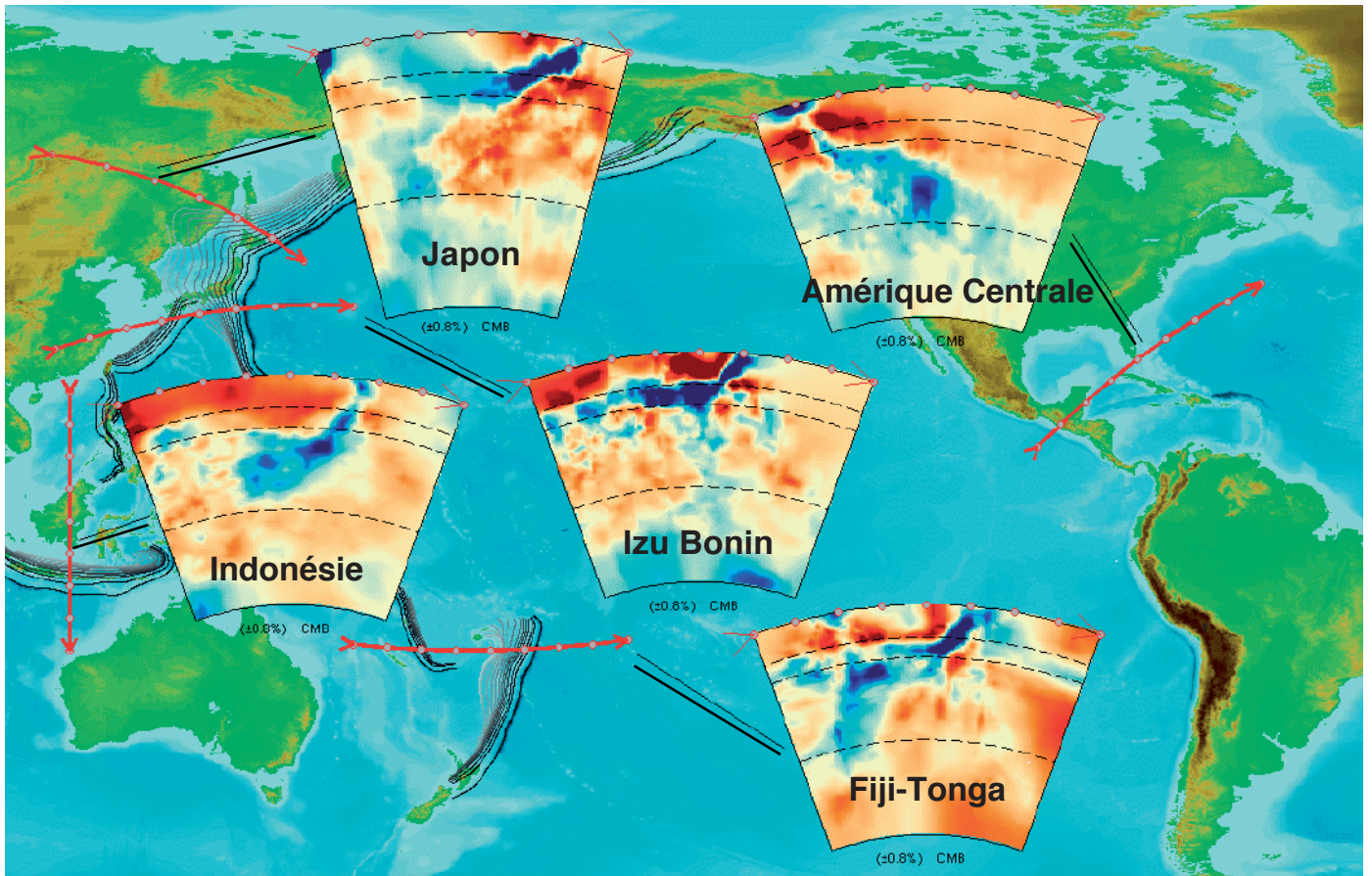


Figure 1 : tomographie sismique de quelques zones de subduction Pacifique (d'après Li, Van der Hilst et al., G-cubed, doi:10.1029/2007GC001806, 2008)

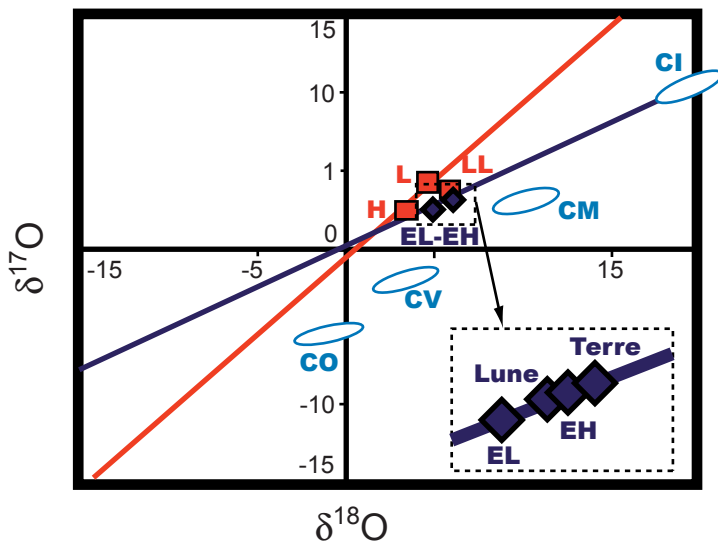


Figure 2 : répartition des chondrites, de la Terre et de la Lune, en fonction de leur composition isotopique en oxygène. La ligne bleue est la ligne de fractionnement terrestre.

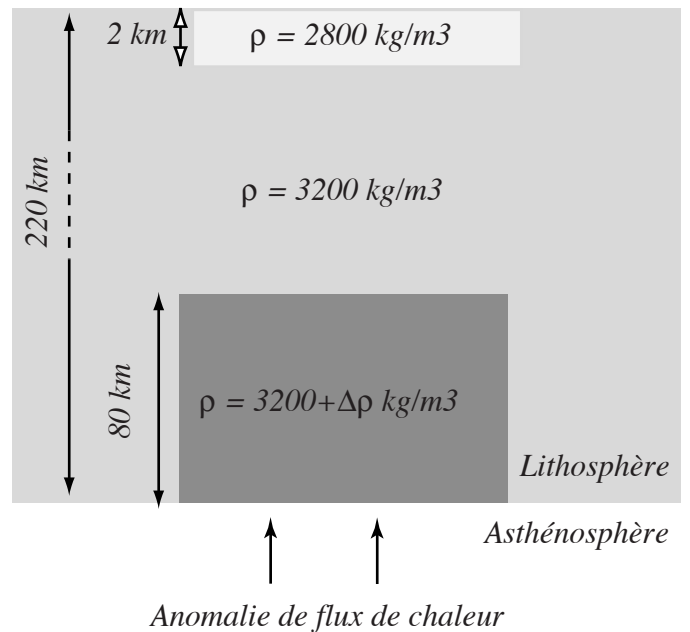


Figure 3 : représentation schématique de la répartition des anomalies de densité à l'endroit d'un bassin intracratonique. L'échelle verticale n'est pas respectée.