

---

**EPREUVE ECRITE DE SCIENCES DE LA TERRE**  
**ENS : PARIS – LYON – CACHAN**

**Durée : 3 heures**      **Coefficients : PARIS option Biologie : 2 / option Géologie : 5**  
**LYON option Biologie : 3 / option sc. de la terre : 5**  
**CACHAN : 2**

**MEMBRES DE JURYS : I. DANIEL, F. GUYOT, V. LIGNIER, 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 la rédaction des copies, et au respect des règles de grammaire, et d'orthographe en particulier.

Nous déplorons également l'absence quasi-générale des calculs littéraux préalablement à toute application numérique. Cela conduit de trop nombreux candidats à des bricolages de chiffres inutiles, ou bien à de longues pages de calculs qui fatalement sont faux, sans même que les candidats s'en aperçoivent.

Cette année, le sujet était ponctué de questions de cours portant essentiellement sur des définitions très classiques. Peu de candidats ont réussi à gagner les points relatifs à ces questions. En effet, soit ils n'y ont pas répondu de façon systématique tout au long du problème, soit les réponses étaient fausses ou comprenaient de graves erreurs.

Nous avons également été surpris de ce qu'aucun candidats n'ai traité les différentes parties du problème, pourtant indépendantes, dans un ordre différent de celui proposé.

**Partie 1: Localisation de l'épicentre d'un séisme**

Cette première partie était facile et a été bien réussie par la plupart des candidats. La plupart des erreurs concernaient les définitions.

1)

Un séisme est un ébranlement bref du sol, c'est à dire un tremblement de terre.

Le foyer d'un séisme est le lieu où s'initie la rupture ; c'est le point à partir duquel se propagent les ondes sismiques.

L'épicentre d'un séisme est la projection à la surface du globe du foyer.

Si foyer et séisme ont été globalement bien définis, beaucoup de candidats ont éprouvé de grandes difficultés à définir ce qu'est un séisme, en confondant notamment les causes, les conséquences et le phénomène lui-même.

2)

Il existe deux grands types d'ondes, les ondes de volume à savoir les ondes P (premières) et S (secondes), et les ondes de surface, c'est à dire les ondes R (Rayleigh) et les ondes L (Love).

Les ondes P et S sont des ondes de volume.

Les ondes S sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent pas dans les milieux liquides à la différence des ondes P de compression.

Les ondes P sont toujours plus rapides que les S.

Nous avons été très surpris de constater que cette question simple posait des problèmes à de trop nombreux candidats. La 'zoologie' des ondes s'est avérée très surprenante avec l'apparition d'ondes G, T, etc... ainsi que d'ondes P dites 'lombric' et d'ondes S dites 'serpent'. Si cette analogie peut

permettre aux étudiants de mieux ‘visualiser’ ces deux types d’ondes, elle ne devrait en aucun cas figurer dans des copies.

3)

Cette question a été traitée de façon très incomplète par la plupart des candidats. Une station sismique est constituée de 3 sismomètres qui enregistrent les mouvements du sol dans un repère orthogonal (vertical, horizontal E et horizontal N) afin de décrire complètement dans l’espace les mouvements du sol.

Si l’arrivée des ondes P à +300 s a été bien identifiée par les candidats, celle des ondes S à +630 s n’a en général pas été remarquée, et a été confondue avec celle des ondes de surface à +850s.

Seuls quelques candidats ont commenté le sens du premier mouvement du sol.

4)

Cette question très classique a été globalement très bien traitée, même si elle a parfois donné lieu à une page de calculs.

$$t_p = d/V_p \text{ et } t_s = d/V_s$$

$$t_{s-p} = d(1/V_s - 1/V_p)$$

5)

a-

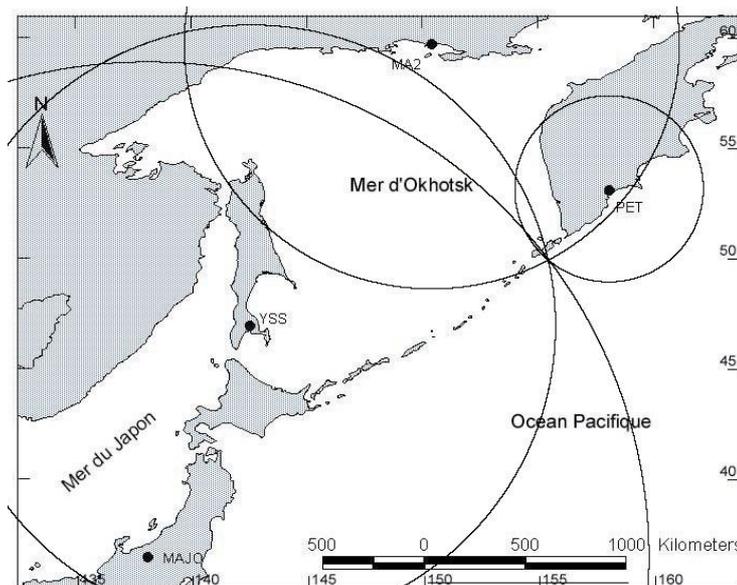
Si la valeur numérique proposée était en général correcte, beaucoup de candidats ont oublié d’indiquer l’unité : 9,78 km/s

b-

Alors qu’un tableau rapide suffisait à consigner les résultats, cette question a souvent donné lieu à une page de calculs.

	ts-p (s)	d (km)
PET	48	469
YSS	155	1515
MA2	126	1232
MAJO	255	2493

c-



L’épicentre du séisme est localisé à l’intersection des quatre cercles, au niveau de l’arc insulaire des Kouriles.

d-

Le séisme est lié à la subduction de la plaque Pacifique sous la plaque eurasiennne. Outre l'activité sismique, la subduction se matérialise également en surface par l'arc insulaire des Kouriles, que beaucoup d'étudiants ont confondu avec le Japon. Le mécanisme au foyer d'un tel séisme est convergent.

6)

On ne donc peut effectuer le calcul qu'à partir de la station PET, et  $M_L = 5,2$ . Pourtant un certain nombre de candidats ont calculé  $M_L$  pour toutes les stations, puis effectué la moyenne...

7)

$$t_p = d/V_p$$

Ainsi, pour PET,  $t_p = 61$  s, soit  $H = 03 : 01 : 03$

## **Partie 2 : recyclage des éléments volatils dans les zones de subduction**

Dans cette seconde partie, les candidats se sont souvent perdus dans des calculs inutiles, n'ont pas profité de ce que beaucoup de questions étaient indépendantes les unes des autres, et n'ont pas non plus saisi l'opportunité des questions de connaissance.

1)

Cette question très classique a donné lieu aux réponses les plus extravagantes. Les erreurs les plus fréquentes concernent la confusion entre croûte continentale et océanique d'une part, entre croûte et lithosphère d'autre part. Nous avons remarqué que certains candidats identifiaient à tort l'ensemble du manteau supérieur à la lithosphère, et associaient le manteau inférieur à l'asthénosphère. L'épaississement du manteau lithosphérique sous-océanique au cours du temps n'a pas souvent été mentionné par les candidats.

2)

a-

De longs développements numériques contenant fatalement des erreurs ont trop souvent été proposés par les candidats.

$$\begin{aligned} Fe &= L_s \times v_s \times (E_o \rho_o X_o + E_m \rho_m X_m) \times 1/3 \\ &= 55000 \times 10^3 \times 0,05 \times (7 \times 10^3 \times 2,9 \times 10^3 \times 0,06 + 5 \times 10^3 \times 3,3 \times 10^3 \times 0,01) \times 1/3 \\ &= 1,268 \times 10^{12} \text{ kg/a} \end{aligned}$$

b-

$$\begin{aligned} X_{e0} &= 1/3 (E_o \rho_o X_o + E_m \rho_m X_m) / (E_o \rho_o + E_m \rho_m) \\ &= (1/3) \times (7 \times 10^3 \times 2,9 \times 10^3 \times 0,06 + 5 \times 10^3 \times 3,3 \times 10^3 \times 0,01) / (7 \times 10^3 \times 2,9 \times 10^3 + 5 \times 10^3 \times 3,3 \times 10^3) = 1,25 \% \end{aligned}$$

3)

Cette question, pourtant plus difficile que les précédentes, a été globalement bien traitée par les candidats.

La lawsonite contient 2 groupements  $H_2O$  par formule structurale, soit 11,4% d'eau en masse  
Les serpentines contiennent également l'équivalent de 2 groupements  $H_2O$  par formule, soit 13,0 % d'eau en masse

a-

Peu nombreux furent les candidats qui ont osé proposer une réponse à cette question de géologie. Les serpentines résultent de l'altération hydrothermale des pyroxènes ou/et de l'olivine. Les serpentinites se forment donc au niveau des zones d'expansion océanique, des

grandes failles transformantes, et dans le coin de manteau surplombant les plaques lithosphériques en subduction.

b-

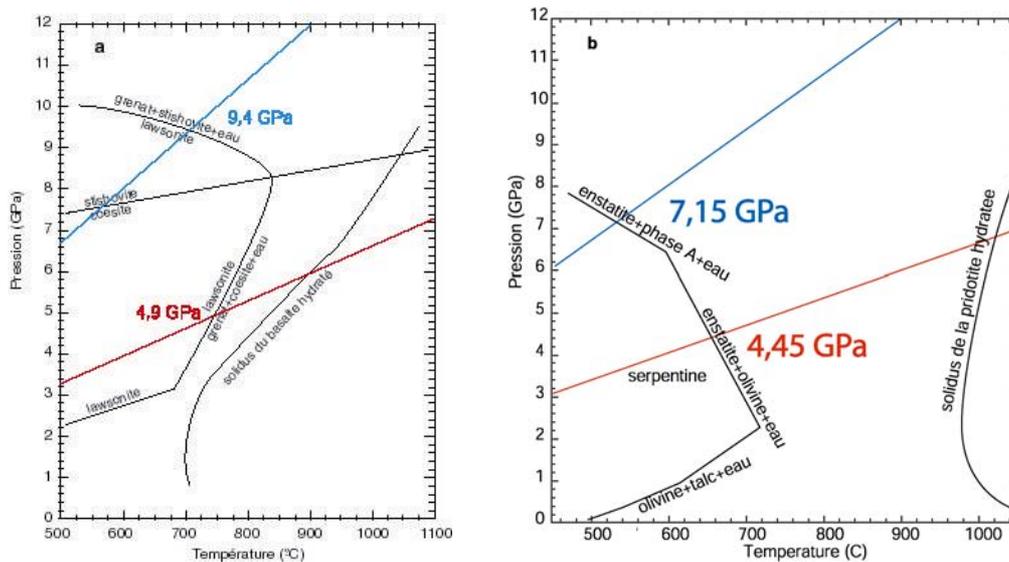


Figure 2 : (a) domaine de stabilité de la lawsonite dans un basalte de type MORB. (b) domaine de stabilité de la serpentine dans une peridotite hydratée.

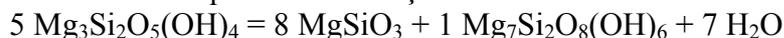
La résolution graphique de la question, puis la conversion des pressions en profondeurs a posé de nombreux problèmes aux candidats qui n'ont pas vérifié les unités des termes de la formule  $dP = \rho g dz$ . Ensuite, quasiment aucun candidat n'a pris le temps de commenter et de comparer les résultats obtenus comme cela était demandé dans l'énoncé.

	200 Ma – 75K/GPa		50 Ma – 150 K/GPa	
lawsonite	9,4 GPa	327 km	4,9 GPa	171 km
serpentine	7,15 GPa	219 km	4,45 GPa	136 km

La lawsonite est donc stable à des profondeurs beaucoup plus importantes que les serpentines dans une plaque âgée en subduction. Dans une lithosphère plus jeune, les profondeurs de déstabilisation de la lawsonite et des serpentines sont réduites et voisines.

d-

La réaction s'équilibre de la façon suivante



La fraction massique d'eau libérée est donc de 9,10% en masse.

4)

a-

$$z = (g \rho_m)^{-1} (-1/0.34) \ln(2/3)$$

La lithosphère océanique plongeante a donc perdu un tiers de son eau à 38 km de profondeur.

b-

Le faible taux de réponse à cette question, et les points d'interrogation laissés par les candidats dans leur copie, nous ont permis de voir que beaucoup d'entre eux ne connaissaient pas la profondeur de la limite sommitale de la zone de transition.

Par application numérique directe de la formule proposée, à 410 km, on obtient

$$Xe_{410\text{km}} = Xe_0 \exp(-0,34 \rho_m g z_{410})$$

La valeur de  $X_{e0}$  vient de la question 2b, et l'on en déduit que la teneur en eau de la lithosphère océanique lorsqu'elle entre dans la zone de transition du manteau est de 0,015% soit 151 ppm.

$$F_{e, 410\text{km}} = F_e \exp(-0,34 \rho_m g z/10)$$

La valeur de  $F_e$  vient de la question 2a, et le flux d'eau associé est de  $1,53 \cdot 10^{10}$  kg/a.

5)

a-

$$F_{\text{recyclé}} = F_e - F_{\text{IAB}} \\ = 1,268 \cdot 10^{12} - 0,875 \cdot 10^{12} = 0,393 \cdot 10^{12} \text{ kg/a}$$

b-

L'origine des magmas d'arc est en général assez bien connue des étudiants, même s'ils oublient parfois d'expliquer leur réponse. Les magmas d'arc proviennent de la fusion partielle du coin mantellique du fait de l'hydratation de la péridotite mantellique par les fluides aqueux libérés par la plaque plongeante. En effet, le solidus de la péridotite hydratée est situé à plus basse température que celui de la péridotite anhydre, et intercepte le géotherme.

c-

$$F_{\text{recyclé}}/F_e = 0,31 \quad P = \int_0^P \exp(-0,34P) dP$$

Soit  $-0,34 P / [\exp(-0,34P) - 1] = 1/0,31$   
qui peut être approché par  $1 + 0,34P/2 = 1/0,31$

On obtient ainsi une profondeur limite pour le recyclage de l'eau dans le manteau profond de 413 km

d-

La différence de profondeur indique qu'il y a une migration ascendante importante des fluides profonds le long de la surface de Benioff, et que le lieu de la fusion partielle également contrôlé par la structure thermique du coin mantellique.

6)

a-

$$F_{\text{MORB}} = 60\,000 \cdot 10^3 \times 7 \cdot 10^3 \times 0,1 \times 2,9 \cdot 10^3 \times 0,003 \\ = 0,365 \cdot 10^{12} \text{ kg}$$

b-

$F_{\text{recyclé}} = 0,393 \cdot 10^{12}$  kg/a.  $F_{\text{recyclé}}$  est donc du même ordre de grandeur que  $F_{\text{MORB}}$  quoique légèrement supérieur. Cette différence n'est probablement pas significative, mais due aux approximations, et/ou à la contribution du volcanisme de point chaud que nous n'avons pas considéré dans cet exercice. Le cycle de l'eau dans le manteau supérieur peut donc être considéré à l'état stationnaire, à l'heure actuelle.

c-

$$\tau = \frac{4}{3} \pi (R_t^3 - (R_t - z_{670})^3) \rho_m X_e / ((F^+ + F^-)/2)$$

Le temps de résidence de l'eau dans le manteau supérieur est donc de 1,4 Ga.

### Partie 3 : Devenir des plaques en subduction dans le manteau terrestre

1)

a-

Nous avons lu beaucoup de définitions qui étaient soit très floues, soit sans grand rapport avec la tomographie sismique (ex : étude des flux de chaleur, modélisation mathématique, scannographie, etc...)

La tomographie sismique donne la localisation et amplitude des anomalies de propagation de vitesse des ondes sismiques par rapport à un modèle moyen de référence.

b-

Nous jugions cette question facile, et nous avons été surpris par l'absence de commentaires du document. La réponse à cette question était en général très superficielle, et ne commentait aucunement le document proposé.

Les zones rapides, en bleu, révèlent la présence de roches plus denses que le manteau environnant, parce que plus denses intrinsèquement, et/ou plus froides que le manteau environnant. Elles permettent de localiser les plaques lithosphériques en subduction dans le manteau.

Dans le manteau supérieur, toutes les anomalies rapides sont très peu épaisses ; leur pendage est variable.

Certaines passent dans le manteau inférieur (Egée, Java, N Tonga, Amérique centrale), et l'épaisseur de l'anomalie rapide augmente tandis que son intensité diminue.

Certaines présentent une forte déflexion dans la zone de transition (S Kouriles, Izu Bonin, et plus ou moins nord Tonga). S Kouriles et Izu Bonin ne semblent pas entrer dans le manteau inférieur.

c-

$E = 100$  km dans le manteau supérieur *s.s.*

$E = 160$  km dans la zone de transition

$E = 0$  à la limite entre le manteau supérieur et le manteau inférieur.

L'épaississement de l'anomalie rapide liée à la plaque Pacifique en subduction dans la zone de transition peut traduire une accumulation temporaire de matière dans la zone de transition.

Le passage de la plaque Pacifique dans le manteau inférieur se fait manifestement de façon discontinue dans cette région.

d-

$$\theta = 43^\circ$$

e-

Le milieu de l'échelle de couleur est atteint, soit +3% d'augmentation.

$$\text{Ainsi } V_p = (1+0,03)V_{p\text{PREM}} = 9,94 \text{ km/s}$$

f-

$$\rho = 3,87 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{PREM}} = 3.78 \text{ g/cm}^3$$

Cela représente une anomalie positive de densité de 2,4 % par rapport au modèle PREM.

g-

$$T - T_{\text{PREM}} = 1/\rho \ln(\rho_{\text{PREM}}/\rho),$$

Soit une différence de température de -905 K.

h-

On considère implicitement que le manteau et la plaque lithosphérique en subduction sont constitués de la même roche : péridotite.

2)

a-

Bien que les exemples soient très nombreux, certains candidats n'ont réussi à trouver deux exemples (La Réunion, Hawaii, Tahiti, etc...)

b-

Un basalte est une roche volcanique résultant du refroidissement rapide d'une lave très fluide de viscosité  $10^2 \text{ Pa s}^{-1}$  à  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ . La fraction vitreuse est le plus souvent prépondérante.

Sa composition chimique en poids d'oxydes est la suivante : 47%  $\text{SiO}_2$  + 14%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 11%  $\text{FeO}$  + 13%  $\text{MgO}$  + 10%  $\text{CaO}$  + 5% divers.

Pétrographie : roche volcanique microlithique, à phéno- et/ou microcristaux de plagioclase, d'olivine, et quelques clinopyroxènes souvent corrodés dans un verre.

c-

Il y a au fond peu de différences pétrographiques, si le basalte se met en place dans les mêmes conditions.

Critères géochimiques : les OIB sont sous saturés en silice. Ils sont très enrichis en éléments fortement incompatibles Ceci est dû au faible taux de fusion partielle qui caractérise les OIB. La différence entre tholéïte d'île océanique et MORB est faible, elle augmente quand on passe aux basaltes alcalins.

Critères isotopiques : Les MORBs sont très homogènes et issus d'un manteau appauvri DMM, tandis que les OIB ont des signatures diverses traduisant la diversité des sources entre le DMM et une source enrichie.

d-

Certaines inclusions magmatiques dans des phénocristaux d'olivine de basaltes du Mauna Loa ont un spectre très proche de celui des gabbros ophiolitiques : anomalie positive en Sr.

Les minéraux caractéristiques de ce spectre sont les plagioclases qui sont enrichis en Sr, qui se substitue aisément à Ca.

Cela indique que ces inclusions sont très vraisemblablement des reliques de gabbros.

e-

Dans la région source des basaltes OIB, c'est à dire dans le manteau inférieur, et plus probablement dans la zone  $D''$ , des roches ont une signature gabbroïque. Or les gabbros ne sont présents que dans la croûte océanique, dans la lithosphère océanique. Il y a donc probablement des fragments de croûte océanique transformée dans la zone  $D''$ . C'est donc que certaines plaques (ou des fragments de plaque) lithosphériques en subduction atteignent la base du manteau inférieur.

#### **Partie 4 : Géologie des zones de subduction**

Cette partie du sujet, à laquelle on pouvait répondre totalement indépendamment des trois précédentes parties n'a été abordée que par de très rares candidats. La réponse aux trois questions posées n'est pas détaillée, parce qu'elle figure de façon classique dans tous les ouvrages de géologie.