

Introduction aux sciences de la Terre

Examen du mercredi 28 avril 2004

Magistère de sciences de la matière, Deuxième année, ENS Lyon.

Documents autorisés : aucun. 3 pages d'énoncé. Durée : 2 h

— o —

I. Sismologie

On cherche à déterminer en première approximation le rayon du noyau de la Terre.

1) On commence par considérer pour cela une Terre homogène, c'est-à-dire dans laquelle les vitesses α et β des ondes P et S sont constantes. Quelle est la forme des rais dans une telle Terre? Donner l'expression des hodochrones $T_P(\theta)$ et $T_S(\theta)$ des ondes directes P et S (T est le temps d'arrivée d'une onde à une distance épacentrale angulaire θ entre le séisme et le sismomètre¹).

2) Sauf vers 120° où elles ne sont pas observées, des mesures donnent comme temps d'arrivée des ondes P :

- $T(60^\circ) = 10 \text{ min } 11 \text{ s}$,

- $T(90^\circ) = 13 \text{ min } 27 \text{ s}$,

- $T(150^\circ) = 19 \text{ min } 47 \text{ s}$,

- $T(180^\circ) = 20 \text{ min } 12 \text{ s}$.

A quelles valeurs de α correspondent-elles? Avez-vous une explication concernant ces résultats?

3) On considère maintenant l'existence d'un noyau de rayon c et de vitesse longitudinale constante α_c . Donner l'expression de l'hodochrone $T_{PcP}(\theta)$ de l'onde P réfléchi en onde P à la surface du noyau.

4) Quelle est la valeur maximale θ_l de θ pour laquelle l'onde PcP existe. Représenter l'allure des hodochrones P et PcP. Que se passe-t-il d'autre à l'angle limite θ_l ?

5) On mesure $T_{PcP}(0^\circ) = 8 \text{ min } 32 \text{ s}$. En admettant que la vitesse trouvée en 2) pour l'onde P observée à 90° soit une bonne approximation de la vitesse moyenne dans le manteau (l'erreur est inférieure à 1%), estimer la profondeur de la discontinuité noyau-manteau et l'erreur sur cette estimation. En déduire la valeur de θ_l , et la vitesse moyenne dans le noyau.

6) Quels arguments pouvez-vous donner pour supposer que le noyau terrestre est essentiellement composé de fer?

¹c.à.d. $\theta = d/R$ avec d la distance séisme-sismomètre à la surface terrestre et R le rayon terrestre.

II. Convection

Nous avons montré que le nombre de Rayleigh d'un fluide visqueux homogène chauffé par en dessous était :

$$Ra = \frac{\rho_0^2 \alpha g \Delta T C_p h^3}{\eta k}$$

1) Expliquer la signification physique de ce nombre comme rapport de processus moteur et dissipatifs.

2) Le manteau d'une planète n'est pas chauffé par en dessous mais par une production de chaleur interne Q . Proposer un nombre de Rayleigh applicable à un manteau planétaire chauffé en volume. (Je rappelle les unités : $\eta = \text{Pa.s}$, $k = \text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $g = \text{m.s}^{-2}$, $C_p = \text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $Q = \text{W.kg}^{-1}$, $h = \text{m}$).

3) Le nombre de Rayleigh critique Ra_c pour un fluide chauffé en volume est de l'ordre de 2800. La convection devient chaotique vers $70Ra_c$. Le nombre de Rayleigh du manteau terrestre est de l'ordre de 10^7 . Que pensez vous de l'état dynamique des manteaux des corps suivants : Mercure (masse $.33 \cdot 10^{24}\text{kg}$, rayon 2400 km), Mars (masse $.642 \cdot 10^{24}\text{kg}$, rayon 3400 km), la Lune (masse $.073 \cdot 10^{24}\text{kg}$, rayon 1700 km), la Terre (masse $5.97 \cdot 10^{24}\text{kg}$, rayon 6400 km) ?

III. Lithosphère océanique

1) Rappeler brièvement comment nous avons établi que la température $T(x, y)$ de la lithosphère océanique à la profondeur y et à la distance x d'une dorsale est donnée par :

$$\frac{T - T_0}{T_A - T_0} = \text{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{\chi x/u}} \right),$$

où

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du,$$

avec $\chi = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$ (diffusivité thermique), T_0 la température du fond des océans, T_A la température uniforme de l'asthénosphère et $u = 10 \text{ cm/an}$ la vitesse de la plaque océanique.

On va admettre que l'isotherme T_L telle que $(T_L - T_0)/(T_A - T_0) = 0.9$ définit la frontière entre l'asthénosphère de densité $\rho_A = 3200 \text{ kg/m}^3$ et la lithosphère de densité $\rho_L = 3280 \text{ kg/m}^3$ (il s'agit d'une simplification par rapport au cours où nous utilisons une densité variant continuellement avec la température, ici, la densité est une fonction discontinue de la température).

2) Que représente la lithosphère pour un système en convection ?

3) Quelle est l'épaisseur de la lithosphère océanique en fonction de son âge ? Les tables numériques donnent $erf(1.1) = 0.88$ et $erf(1.2) = 0.91$, quelle est l'épaisseur d'une lithosphère d'âge 100 ma (millions d'années) ?

4) En supposant l'équilibre isostatique, quel est l'enfoncement $w(x)$ du fond océanique en fonction de la distance à la dorsale ? Quel est l'enfoncement d'une lithosphère de 100 ma ($\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$) ?

Dans ce qui suit on va considérer une plaque océanique carrée de côté $D = 6000 \text{ km}$, se déplaçant à la vitesse $u = 10 \text{ cm/an}$, d'une dorsale vers une zone de subduction. Ses deux autres côtés sont des failles transformantes.

5) Définir subduction, dorsale et failles transformantes. Donnez des exemples géographiques.

6) Quelle est l'épaisseur moyenne de cette plaque, son âge moyen, son enfoncement moyen par rapport au sommet de la dorsale supposé à l'altitude zéro ?

On va admettre que les aires moyennes des océans et des continents ainsi que la différence d'altitude entre continents et dorsales n'ont pas changé au cours du dernier milliard d'années.

7) Est-ce raisonnable ?

8) En déduire que le niveau moyen des mers (niveau marin mesuré par rapport aux continents) est lié à l'âge moyen de la lithosphère océanique. Au Crétacé, il y a 80 ma, les terres émergées étaient fort réduites et le niveau marin était de 300 m au dessus de celui d'aujourd'hui. Quels étaient l'âge moyen des fonds océaniques et la vitesse moyenne des plaques océaniques ? (actuellement l'âge moyen des fonds océaniques est de 120 ma et la vitesse moyenne de 10 cm/an).

— o —