

Géophysique - M1 de physique, ENS de Lyon

CORRIGÉ

Examen, mars 2012, 3 h - document autorisé : aucun

— o —

I. Géomagnétisme

Le champ magnétique terrestre est un champ vectoriel, qui a approximativement la forme d'un champ dipolaire dont l'axe N-S est légèrement incliné par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Les pôles sont par définition les endroits où le champ est vertical et l'équateur là où il est horizontal. Ce champ est généré dans le noyau liquide métallique par un phénomène de dynamo auto-entretenu, auquel se superpose un champ rémanent crustal. Le champ magnétique varie dans l'espace (dipolaire, mais aussi il dévie par rapport au dipôle) et dans le temps, à courte et grande échelle de temps. Il y a plus particulièrement des inversion N-S \leftrightarrow S-N.

II. Sismologie

1. Les ondes sismiques sont générées par les séismes qui sont des mouvements brusques le long de failles et qui transmettent ce mouvement au milieu élastique environnant. Les ondes générées sont :

- ondes de volume, P longitudinale et S transverse,
- ondes de surface, Rayleigh (mouvement elliptique dans le plan vertical longitudinal) et Love (mouvement transverse),
- ondes stationnaires ou modes propres, de périodes inférieures à 53 min.

2. Ondes P à 600 s (sur NS et V), ondes S à 1050 s (3 composantes), Love vers 1450 s (EW), Rayleigh vers 1450 s (NS et V). Pas de P sur EW donc la direction du séisme est NS d'où le fait que Love soit sur EW et Rayleigh sur les autres.

3. $t_P - t_S = 450$. En reportant sur les hodochrones on trouve environ 55 degrés soit 6000 km.

4. Pas de P sur EW donc la direction du séisme est NS : l'azimut du séisme est 0 (ou 180) degrés.

5. $\tan i = \text{amplitude horizontale de P} / \text{amplitude verticale de P} \simeq 0,5$
càd $i \simeq 30^\circ$

III. Convection et conduction de la chaleur

1. Le thermodynamicien dit que le manteau est dans une phase solide. Pour le mécanicien le caractère fluide ou solide dépend de l'échelle de temps. A courte échelle de temps (la seconde, le jour, l'année) le manteau est solide élastique : les ondes élastiques P et S s'y propagent. A longue échelle de temps le manteau peut être vu comme un fluide visqueux : il y a des mouvements de convection, qui en surface s'appelle tectonique des plaques. Un exemple d'une telle double rhéologie est fournie par le glacier, qui bien que solide s'écoule néanmoins.

2. Le nombre de Rayleigh compare les effets entraînants pour la convection (force d'Archimède) et les effets freinants (viscosité et diffusion de la chaleur). Au dessus d'un Rayleigh critique ($\simeq 700$) la convection a lieu. Dans le manteau Terrestre $Ra \simeq 10^7$ donc la convection a lieu.

3. Le transport de chaleur se fait par conduction et convection. Le manteau et le noyau sont en convection : au coeur de la convection la température est quasi constante (plus exactement elle varie suivant un gradient adiabatique $\simeq 0,5^\circ/\text{km}$ dans le manteau), les bords de la convection sont des couches limites dans lesquelles le transport est conductif et la température varie beaucoup plus vite ($\simeq 30^\circ/\text{km}$ en surface). Courbe $T(r)$: voir cours. Celle-ci est ancrée à 410 et 660 km de profondeur par les données expérimentales de changement de phase de l'olivine, et par le prolongement adiabatique jusqu'au sommet du noyau liquide de la température de changement de phase de Fe-Ni à la base du noyau.

4. Bilan, le manteau perd : $Q - q - Q' = 46 - 20 - 8 = 18$ TW, donc il se refroidit. Si on néglige la variation de volume : $MCdT/dt = -Q + q + Q'$. On trouve environ 100 K par milliard d'années.

IV. Rotation des planètes

1. Les quantités intervenant sont la densité, la vitesse et la force au point M. C'est l'équivalent du pfd pour la rotation : le moment cinétique est une mesure de « la quantité de mouvement en rotation ». Sa variation est due à « la quantité de force qui la met en rotation (couple de forces) ». Applications : la patineuse qui replie les bras tourne plus vite. La Terre transfère du moment cinétique à la Lune. La toupie se met en précession.

2. Une force de marée est l'attraction d'un astre « vue dans le repère d'un autre astre » c'ad en lui retranchant l'accélération du deuxième astre. Cette force déforme la Terre solide et liquide (marées) et fait tourner son axe (précession).

3. La vitesse de l'astre est composée d'une translation autour du Soleil (à vitesse linéaire ωd) et d'une rotation autour de son axe (vitesse angulaire Ω). Ceci se traduit par la décomposition du moment cinétique en deux parties.

4. La vitesse angulaire de révolution, égale à 2π sur la période de révolution, est donnée par la loi de Képler $G(M_{Soleil} + M_{Planete})/d^2 = \omega^2 d$. On trouve alors :

Planète	Période révolution (j)	Moment rotation (10^{40} kg.m ² /s)	Moment révolution (10^{40} kg.m ² /s)	log{M.rot./masse/ (m ² /s)}	log{M.rév./masse/ (m ² /s)}
Soleil	0	16,3	0	10,91	-
Mercure	88,16	$8,02 \cdot 10^{-11}$	0,09	6,39	15,44
Vénus	224,01	$-1,77 \cdot 10^{-9}$	1,84	6,56	15,58
Terre	365,19	$5,87 \cdot 10^{-7}$	2,67	8,99	15,65
Mars	687,11	$1,93 \cdot 10^{-8}$	0,35	8,48	15,74
Jupiter	4331,04	$4,10 \cdot 10^{-2}$	1931,02	11,33	16,01
Saturne	10758,68	$6,57 \cdot 10^{-3}$	784,57	11,06	16,14
Uranus	30686,40	$1,27 \cdot 10^{-4}$	169,83	10,16	16,29
Neptune	60187,66	$1,59 \cdot 10^{-4}$	249,23	10,19	16,39

De façon générale les moments de révolution sont bien plus importants que ceux de rotation. D'autre part le Soleil représente plus de 99% de la masse du système solaire mais moins de 1% de son moment cinétique.

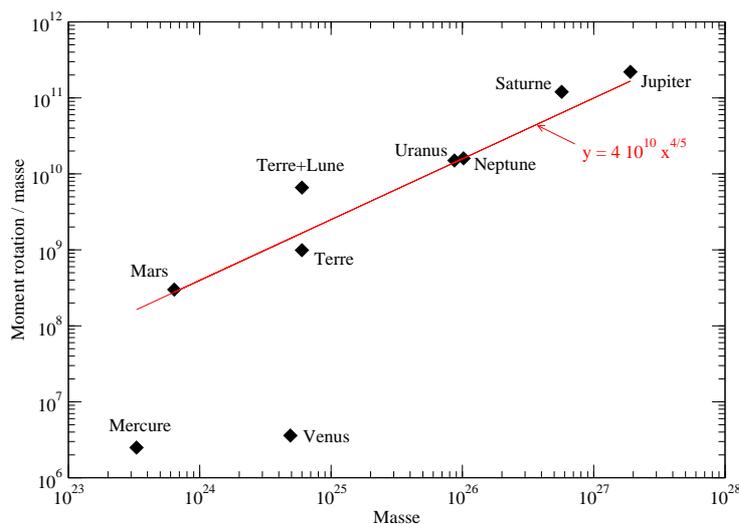


FIG. 1 – Moments cinétiques massiques (en m^2/s) des planètes en fonction de leur masse (kg).

5. Quand on représente les moments de rotation par unité de masse en

fonction des masses dans un diagramme log-log il semble y avoir un alignement. La droite $y = 0.25 \times 10^{-10} M^{4/5}$ (en u.s.i.) fournit une loi empirique correcte. Cette corrélation provient probablement du fait que la rotation est acquise au moment de la formation par les impacts et que plus la masse est grande plus elle attire d'impacts. La Terre se situe en dessous de cette loi probablement à cause du freinage de marée.

6. On écrit $I\omega = y$ au point y de la droite correspondant à la masse terrestre. On trouve qu'on aurait une période de rotation de 14 h.

7. Soit $\omega = 2\pi/T_L$ la vitesse angulaire de révolution de la Lune (et de la Terre). Soit G le centre de masse : $M\vec{GT} + m\vec{GL} = \vec{0}$ donc $GT = dm/(M+m) = 4680$ km. En dérivant on obtient $Mv_T + mv_L = \vec{0}$ si bien que le moment de révolution peut se mettre sous la forme (les distances sont algébriques) $H = MGTv_T + mGLv_L$. Le premier terme est celui de la Terre et vaut

$$MGTv_T = MGT^2\omega = Mm^2d^2\omega/(m+M)^2 \simeq md^2\omega m/M = 3,6.10^{32} \text{ kg.m}^2/\text{s}, \quad (1)$$

Le deuxième est celui de la Lune et vaut

$$mTLv_L = mTL^2\omega = mM^2d^2\omega/(m+M)^2 \simeq md^2\omega = 2,9.10^{34} \text{ kg.m}^2/\text{s}, \quad (2)$$

La somme des deux vaut $Mmd^2\omega/(m+M)$, soit $H = 3.10^{34} \text{ kg.m}^2/\text{s}$, donc $H/M = 5.10^9 \text{ m}^2/\text{s}$. Sur le diagramme précédent le système Terre-Lune se place au dessus de la droite.

8. Si le moment cinétique du système Terre-Lune est entièrement attribué à la rotation diurne de la Terre alors la période de rotation correspondante est de 4 h.

On a vu en cours que : a. le moment cinétique du système T+L est constant (système isolé). b. celui de la Terre diminue à cause des frottements. Il est transféré à la Lune : c. celui de la Lune augmente : elle est accélérée par le bourrelet terrestre.

9. On peut en déduire une histoire (hypothétique ?) de la durée du jour : à l'origine la Terre tournait en 14 h, un impact l'accélère et dans le même temps détache la Lune ; au moment du détachement de la Lune, la période de rotation du système est 4 h ; une grande partie du moment cinétique est alors pris par le mouvement orbital de la Lune ; depuis, le moment cinétique de la Terre diminue progressivement du fait des forces de marées et est transféré à la Lune.