

**THESE**

présentée

A L'UNIVERSITE DE PARIS VII

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS VII

spécialité: GEOPHYSIQUE INTERNE

par **Dominique JAULT**

sujet: **VARIATION SECLAIRE DU CHAMP GEOMAGNETIQUE ET  
FLUCTUATIONS DE LA LONGUEUR DU JOUR**

soutenue le 21 Fevrier 1990 devant le jury composé de

M.	J.L.	LE MOUEL	Président
M.	C.	BOUCHER	Examineur
Mme	N.	CAPITAINE	Rapporteur
M.	C.	JAUPART	Rapporteur
M.	J.F.	MINSTER	Examineur
Mme	K.	WHALER	Examineur

## REMERCIEMENTS

Jean-Louis Le Mouél a dirigé la préparation de ce mémoire. Il fut toujours disponible et a su me guider en soulignant les points positifs de mon travail. L'une de mes principales motivations, durant cette étude, fut de le voir approuver mes résultats. Enfin, ce mémoire est devenu beaucoup plus lisible après les corrections qu'il lui a apportées. Je souhaite lui témoigner ici toute ma reconnaissance.

L'aide de Gauthier Hulot, durant la phase finale de cette étude, fut précieuse. Je lui dois plusieurs calculs numériques et la préparation d'une partie des figures illustrant ce mémoire. Je l'en remercie vivement.

Ce travail fut rendu possible par des calculs de mouvements à la surface du noyau réalisés, en grande partie, par Camille Gire. Je lui suis reconnaissant de s'être toujours prêtée de bonne grâce à mes questions.

Je veux également remercier les responsables de l'Institut Géographique National (en particulier, Claude Boucher et Jacques Moschetti), qui m'ont tout d'abord autorisé à entreprendre la préparation de ce mémoire, puis m'ont laissé m'y consacrer à temps complet.

Des discussions avec différents chercheurs de l'Institut de Physique du Globe (Yves Cohen, Vincent Courtillot, Jean Gavoret, Michel Menvielle, Jean-Paul Poirier, Bernard Valette) m'ont permis de mieux comprendre le contexte de ce travail. Je les en remercie.

J'ai apprécié les demi-journées de réflexion avec Jacques Hinderer et Hilaire Legros à Paris comme à Strasbourg et je suis heureux de les remercier ici.

Un travail aussi passionnant soit-il n'aurait aucune valeur s'il n'était le prétexte à des rencontres. Ainsi, Pascal Mouge, Pierre Morat, Jeanne Cariat, Sylvie Gruszow, Ahmed Terra, et Mohamed Hamoudi sont devenus des amis.

Nicole Capitaine, Claude Jaupart, Jean-François Minster et Kathy Whaler me font l'honneur de juger ce travail. Je les en remercie.

Gisèle Dupin dessina les figures incluses dans ce mémoire. Je l'en remercie.

## INTRODUCTION

Les variations du champ magnétique terrestre et les fluctuations de la longueur du jour sont les seules observations apportant des informations sur les mouvements animant la partie liquide du noyau de la Terre. L'étude du champ magnétique terrestre, qui provient principalement du noyau, et de son évolution sur des périodes de cinq à cent ans (la variation séculaire) a permis d'estimer l'amplitude de ces mouvements et de contraindre leur géométrie à la surface du noyau. Les fluctuations de la longueur du jour correspondent à des variations du moment cinétique de la partie solide de la Terre (le manteau); le principe de conservation du moment cinétique total d'un système isolé est la clef de toute discussion de leur origine physique. Parmi les différents corps exerçant des forces sur le manteau, seul le noyau est susceptible de voir son moment cinétique varier suffisamment sur des périodes de l'ordre de 10 ans pour pouvoir compenser les variations du moment cinétique du manteau. Les fluctuations de la longueur du jour dites décennales, c'est à dire dont les constantes de temps sont de l'ordre de 10 ans, constituent ainsi une mesure globale des mouvements dans l'ensemble du noyau.

Les premiers modèles dynamiques du noyau interprétèrent ces deux types d'observation, variation séculaire du champ magnétique et fluctuations décennales de la longueur du jour, comme la conséquence d'une rotation en bloc de la partie externe du noyau fluide. Cela expliquait la dérive vers l'ouest de la figure du champ magnétique, qui était alors tenue comme la principale caractéristique de la variation séculaire du champ. Par ailleurs, l'épaisseur de cette coquille sphérique pouvait être calculée de manière à ce que les variations de son moment cinétique équilibrent celles du manteau.

Aujourd'hui, les irrégularités de la rotation de la Terre sont beaucoup mieux connues. L'interprétation du ralentissement séculaire (c'est à dire régulier sur plusieurs centaines d'années) de la vitesse angulaire de rotation comme résultat de l'action des forces de marée de la Lune, et celle des fluctuations rapides (quelques jours à quelques mois) de la longueur du jour par des échanges de moment cinétique avec l'atmosphère sont solidement étayées. Cependant, les irrégularités dites décennales de la rotation de la Terre restent moins bien comprises: les mouvements à la surface du noyau, dont nous ne connaissons pourtant que les structures de grande échelle, sont beaucoup plus complexes qu'une simple rotation relative de l'ensemble de la surface par rapport au manteau et les mouvements du fluide dans les profondeurs du noyau ne jouent aucun rôle dans les variations du champ magnétique enregistrées dans les observatoires (et donc durant un intervalle de temps assez court, de l'ordre de cent ans).

Dans la première partie de ce mémoire, je propose une évaluation des variations du moment cinétique du noyau que je compare aux variations du moment cinétique du manteau. Pour cela, je rappelle brièvement dans un premier chapitre quelles sont les irrégularités de la rotation de la Terre dont l'origine doit être recherchée dans le noyau. Dans un second chapitre, j'explique, de manière détaillée, comment la variation séculaire du champ magnétique terrestre nous renseigne sur la vitesse du fluide à la surface du noyau, pourquoi cependant elle ne suffit pas à la déterminer, et quelles informations supplémentaires nous permettent de proposer des modèles de mouvement. Enfin, je développe les hypothèses permettant de déduire le moment cinétique de l'ensemble du noyau des seuls mouvements à la surface. Nous vérifierons alors que le noyau peut être tenu pour responsable des fluctuations de la longueur du jour: il y a échange de moment cinétique entre le noyau et le manteau.

Il reste alors à comprendre les mécanismes physiques provoquant cet échange. C'est là l'objet d'une seconde partie décrivant les couples susceptibles d'agir entre le noyau et le manteau: couple exercé par les forces de Lorentz dans le manteau inférieur et couple des forces de pression agissant à l'interface noyau-manteau. L'étude de ces couples bénéficie aujourd'hui d'une meilleure connaissance des mouvements au sommet du noyau, mais bénéficie peut-être encore plus des travaux théoriques, qui furent nécessaires au calcul de ces mouvements. Ainsi, nous remarquerons que les courants électriques responsables de la principale partie du couple exercé par les forces de Lorentz dans le manteau inférieur ne sont associés à aucune variation mesurable du champ magnétique à la surface de la Terre; leur calcul nécessite la connaissance de la partie des mouvements de la surface du noyau sur laquelle la variation séculaire du champ ne nous renseigne pas directement: l'estimation de ce couple dépend du choix de l'information a priori sur les mouvements. De même seule l'hypothèse géostrophique (équilibre entre les composantes tangentielles des forces de pression et de Coriolis), que nous avons adoptée pour contraindre les mouvements, nous permet de calculer, une fois les mouvements connus, la pression à la surface du noyau, et donc le couple exercé par cette pression sur le manteau. Cette seconde partie fait l'objet d'une introduction spécifique.

## CONCLUSION

La confrontation d'une théorie des échanges de moment cinétique entre noyau et manteau aux observations se ramène toujours à une comparaison entre deux séries temporelles: les fluctuations  $\Delta T(t)$  de la longueur du jour de temps caractéristique supérieur à quelques années (ou du couple subi par le manteau, déduit de  $d(\Delta T)/dt$ ) et une quantité calculée à partir de la variation séculaire  $\dot{B}(t)$  du champ magnétique. Aujourd'hui notre connaissance de la variation du champ d'origine interne a suffisamment progressé pour que nous ne fassions plus appel à des paramètres magnétiques plus ou moins ad-hoc (termes particuliers d'un développement en harmoniques sphériques, déclinaison magnétique en un lieu); nous pouvons au contraire tester nos théories en utilisant des paramètres ayant une réelle signification physique (vitesse à la surface du noyau ou partie toroïdale zonale de cette vitesse).

J'ai mis en avant dans ce mémoire deux types d'arguments relatifs aux variations temporelles des mouvements. Nous avons ainsi remarqué que les mouvements  $\vec{u}$  dans le noyau tendent à varier moins rapidement que les couples  $\Gamma$  agissant sur le manteau; cette observation permet de dégager une caractéristique commune aux deux couples (des forces de Lorentz et de pression) susceptibles d'agir entre le noyau et le manteau puisque leurs théories aboutissent l'une et l'autre à une relation linéaire entre mouvements et couple. Ainsi, Stix et Roberts (1984) ont imaginé qu'un second couple (le couple de diffusion) s'oppose au couple électromagnétique stable associé à la partie principale, stationnaire des mouvements (voir II.1.5.3). De même, nous avons supposé, dans notre étude du couple de pression, que la partie constante de la pression associée aux mouvements dans le noyau n'exerce aucun couple (II.2.4) sur le manteau. Mais une analyse

de temps caractéristique ne vaut pas une comparaison directe entre deux séries temporelles. Nous avons tenté une telle comparaison entre les variations du moment cinétique du noyau déduites des mouvements toroïdaux zonaux calculés à la surface du noyau et les variations du moment cinétique du manteau déduites des irrégularités de la longueur du jour, mais seulement sur une courte période (20 ans). Ces deux types d'arguments pèchent l'un comme l'autre par la quantité trop limitée d'informations sur lesquelles ils s'appuient. La qualité d'une série temporelle se mesure au rapport entre la longueur de la série et le laps de temps permettant de déceler une variation significative du paramètre mesuré. Si on applique ce critère d'évaluation à nos données de mouvements à la surface du noyau, nous réalisons que nous n'avons pu distinguer que deux époques (65-70 et 78-82) au cours de l'intervalle de temps étudié. Il faut faire mieux.

Dans un premier temps, il faut consolider nos résultats actuels en utilisant des modèles de variation séculaire (construits comme la plupart des modèles à partir des moyennes annuelles des éléments magnétiques enregistrés dans les observatoires) dont nous connaissons bien les caractéristiques (période de recueil de données, temps de lissage, matrice de covariance des erreurs). Ensuite, pour diminuer l'intervalle de temps minimum permettant de déceler une variation significative, on peut envisager de traiter directement les moyennes mensuelles des données d'observatoires puis de les lisser nous-même. Le travail de Gavoret et al. (1986) indique qu'il est raisonnable d'espérer mettre ainsi en évidence des variations de temps caractéristique de l'ordre de trois à cinq ans. Il serait peut-être d'ailleurs possible d'utiliser la méthode appliquée par Feissel et Gavoret (1987) au traitement des fluctuations de la longueur du jour puisque le champ magnétique d'origine externe présente d'importantes variations saisonnières. Nous devons également essayer d'allonger la durée de nos séries temporelles. Il serait, en particulier, important de disposer des limites de résolutions spatiale

et temporelle des données de variation séculaire pour différentes époques. Langel et al. (1986) ont proposé une limite de résolution spatiale mais le travail de Bloxham et Gubbins (1985) a remis en question cette estimation. A ma connaissance, il n'y a pas encore eu d'études claires de la limite de résolution temporelle des séries magnétiques comparables à celle que Lambeck (1980) a menée pour les fluctuations de la longueur du jour (voir I.1.2).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achache J., Courtillot V., Ducruix J., Le Mouél J.L., 1980  
 "The late 1960's secular variation impulse: further constraints on the deep mantle conductivity"  
*Phys. Earth Planet. Inter.*, 23, 72-75
- Achache J., Le Mouél J.L., Courtillot V., 1981  
 "Long-period geomagnetic variations and mantle conductivity: an inversion using Bailey's method"  
*Geophys.J.astr.Soc.*, 65, 579-601
- Backus G.E., 1968  
 "Kinematics of the secular variation in a perfectly conducting core"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, A263, 239-263
- Backus G.E., 1983  
 "Application of mantle filter theory to the magnetic jerk of 1969"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, 74, 713-746
- Backus G.E., 1988  
 "Bayesian inference in geomagnetism"  
*Geophys.J.*, 92, 125-142
- Backus G.E., Le Mouél J.L., 1986  
 "The region on the core-mantle boundary where a geostrophic velocity field can be determined from frozen-flux magnetic data"  
*Geophys.J.R.astr.Soc.*, 85, 617-628
- Barraclough D., Gubbins D., Kerridge D., 1989  
 "On the use of horizontal components of magnetic field in determining core motions"  
*Geophys.J.Int.*, 98, 293-299
- Benton E.R., Estes R.H., Langel R.A., 1987  
 "Geomagnetic field modeling incorporating constraints from frozen-flux electromagnetism"  
*Phys.Earth Planet. Inter.*, 48, 241-264
- Benton E.R., Loper D.E., 1969  
 "On the spin-up of an electrically conducting fluid 1. The unsteady hydromagnetic Ekman-Hartman boundary layer problem"  
*J.Fluid Mech.*, 39, 561-586
- Benton E.R., Muth L.A., 1979  
 "On the strength of electric currents and zonal magnetic fields at the top of the Earth's core: methodology and preliminary estimates"  
*Phys.Earth Planet. Inter.*, 20, 127-133
- Benton E.R., Whaler K., 1983  
 "Rapid diffusion of the poloidal geomagnetic field through the weakly conducting mantle: a perturbation solution"  
*Geophys.J.R.astr.Soc.*, 75, 77-100

- Bloxham J., 1986  
 "The expulsion of magnetic flux from the Earth's core"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **87**, 669-678
- Bloxham J., 1988  
 "The dynamical regime of fluid flow at the core surface"  
*Geophys.Res.Lett.*, **15**, 585-588
- Bloxham J., 1989  
 "Simple models of fluid flow at the core surface derived from geomagnetic field models"  
*Geophys.J.Int.*, **99**, 173-182
- Bloxham J., Gubbins D., 1985  
 "The secular variation of Earth's magnetic field"  
*Nature*, **317**, 777-781
- Bloxham J., Gubbins D., 1987  
 "Thermal core-mantle interactions"  
*Nature*, **325**, 511-513
- Bloxham J., Gubbins D., Jackson A., 1989  
 "Geomagnetic secular variation"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, **A329**, 415-502
- Bloxham J., Jackson A., 1990  
 "Simultaneous stochastic inversion for geomagnetic main field and secular variation 2 1820-1980"  
 soumis à *J.Geophys.Res.*
- Braginsky S.I., 1970  
 "Torsional magnetohydrodynamics vibrations in the earth's core and variations in day length"  
*Geomag.Aeron.*, **10**, 1-8 (pour la traduction anglaise)
- Braginsky S.I., 1984  
 "Short-period geomagnetic secular variation"  
*Geophys.Astrophys.Fluid Dyn.*, **30**, 1-78
- Braginsky S.I., Fishman V.M., 1976  
 "Electromagnetic coupling of the core and mantle when electrical conductivity is concentrated near the core boundary"  
*Geomagnetism and aeronomy*, **16**, 443-446
- Bullard E.C., 1948  
 "The secular change in the earth's magnetic field"  
*Mont.Not.Roy.astr.Soc.Geophys. suppl* **5** 248-257
- Bullard E.C., Freedman C., Gellman H., Nixon J., 1950  
 "The westward drift of the Earth's magnetic field"  
*Phil.Trans.Roy.Soc.London*, **A243**, 67-92
- Bullard E., Gellman H., 1954  
 "Homogeneous dynamos and terrestrial magnetism"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, **A247**, 213-278

- Bullen, 1975  
 "The Earth's density"  
 Chapman and Hall, Londres
- Capitaine N., 1982  
 "Effets de la non-rigidité de la Terre sur son mouvement de rotation: étude théorique et utilisation d'observations"  
 Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI
- Carter W.E., Robertson D.S., Pettey J.E., Tapley B.D., Schutz B.E., Eanes R.J., Miao Lufeng, 1984  
 "Variations in the rotation of the Earth"  
*Science*, **224**, 957-961
- Cazenave A., Daillet S., 1981  
 "Lunar tidal acceleration from Earth satellite orbit analyses"  
*J.Geophys.Res.*, **86**, 1659-1663
- Chao B.F., Gross R.S., 1987  
 "Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes"  
*Geophys.J.R.astr.Soc.*, **91**, 569-596
- Chao B.F., 1989  
 "Length-of-day variations caused by El-Niño southern oscillation and quasi-biennial oscillation"  
*Science*, **243**, 923-925
- Cohen Y., 1989  
 "Traitements et interprétations de données spatiales en géomagnétisme: étude des variations latérales d'aimantation de la lithosphère terrestre"  
 Thèse, Université Paris VII
- Christodoulis D.C., Smith D.E., Williamson R.G., Klosko S.M., 1988  
 "Observed tidal braking in the Earth/Moon/Sun system"  
*J.Geophys.Res.*, **93**, 6216-6236
- Courtillot V., Ducruix J., Le Mouél J.L., 1978  
 "Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre"  
*C.R.Acad.Sci.Paris*, **287**, 1095-1098
- Courtillot V., Le Mouél J.L., 1988  
 "Time variations of the Earth's magnetic field: from daily to secular"  
*Ann.Rev. Earth Planet. Sci.*, **16**, 389-476
- Daillet S., 1981  
 "Contribution à l'interprétation du mouvement du pôle par des phénomènes géophysiques, météorologiques et océanographiques"  
 Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse
- Ducruix J., Courtillot V., Le Mouél J.L., 1980  
 "The late 1960,s secular variation impulse, the eleven year magnetic variation and the electrical conductivity of the deep mantle"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **61**, 73-94

- Elsasser, 1946  
 "Induction effects in terrestrial magnetism Part I Theory"  
*Physical review*, **69**, 106-116
- Eubanks T.M., Steppe J.A., Dickey J.O., Callahan P.S., 1985  
 "A spectral analysis of the Earth's angular momentum budget"  
*J.Geophys.Res.*, **90**, 5385-5404
- Fearn D.R., Loper D.E., 1981  
 "Compositional convection and stratification of Earth's core"  
*Nature*, **289**, 393-394
- Fearn D.R., Roberts P.H., Soward A.M., 1988  
 "Convection, stability and the dynamo"  
 dans "Energy stability and convection", pp 60-324, Galdi G.P. et Straughan B. ed., Pitman research notes in mathematics series, Longman
- Feissel M., 1983  
 "Sur l'évaluation des irrégularités de la rotation terrestre"  
 Thèse, Université Pierre et Marie Curie Paris VI
- Feissel M., 1990  
 "Accuracy of the determination or prediction of Earth orientation parameters"  
 Proceedings IAG Symposium 105: "Earth rotation and coordinate reference frames", Edimbourg (août 1989).
- Feissel M., Gavoret J., 1987  
 "ENSO-related signals in Earth rotation 1962-87"  
 IUGG abstract, Vancouver, août 1987
- Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouél J.L., 1986  
 "Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field"  
*J.Geophys.Res.*, **91**, 4787-4796
- Gire C., 1985  
 "Sur la variation séculaire du champ magnétique terrestre et les mouvements des couches externes du noyau fluide"  
 Thèse, Université Paris VII
- Gire C., Le Mouél J.L., 1990  
 "Tangentially geostrophic flow at the core-mantle boundary compatible with the observed geomagnetic secular variation: the large-scale component of the flow"  
 à paraître dans *Phys. Earth Planet. Inter.*
- Gire C., Le Mouél J.L., Madden T., 1984  
 "The recent westward drift rate of the geomagnetic field and the body drift of external layers of the core"  
*Annales Geophysicae*, **2**, 1, 37-46
- Gire C., Le Mouél J.L., Madden T., 1986  
 "Motions at the core surface derived from s.v. data"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **84**, 1-29

- Greiner-Mai, 1989  
 "Untersuchungen zur magnetischen Kern-Mantel-Kopplung und zu ihrem Einfluss auf die Erdrotation"  
 Contribution n° 105 de Zentralinstitut für Physik der Erde, Postdam
- Gubbins D., Bloxham J., 1985  
 "Geomagnetic field analysis III"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **80**, 695-713
- Gubbins D., Roberts P.H., 1987  
 "Magnetohydrodynamics of the Earth's core"  
 dans *Geomagnetism*, vol. 2, ed. Jacobs J.A. Academic Press, Londres
- Gubbins D., Thomson C.J., Whaler K.A., 1982  
 "Stable regions in the Earth liquid core"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **68**, 241-251
- Guinot B., 1982  
 "The Chandlerian nutation from 1900 to 1980"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **71**, 295-301
- Hide, 1969  
 "Interaction between the Earth's liquid core and solid mantle"  
*Nature*, **222**, 1055-1056
- Hide R., 1978  
 "How to locate the electrically conducting fluid core of a planet from external magnetic observations"  
*Nature*, **271**, 640-641
- Hide R., Stewartson K., 1972  
 "Hydromagnetic oscillations of the Earth's core"  
*Rev.Geophys.Space Phys.*, **10**, 579-598
- Hinderer J., Gire C., Legros H., Le Mouél J.L., 1987  
 "Geomagnetic secular variation, core motions and implications for the Earth's wobble"  
*Phys. Earth Planet. Inter.*, **49**, 121-132
- Hinderer J., Jault D., Legros H., Le Mouél J.L., 1990  
 "Core-mantle topographic torque: a spherical harmonic approach and implications for the excitation of the Earth's rotation by core motions"  
 accepté pour publication dans *Phys. Earth Planet. Inter.*
- Hodder B., 1981  
 "Geomagnetic secular variation since 1901"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **65**, 763-776
- Hulot G., Le Mouél J.L., Jault D., 1990  
 "The flow at the core-mantle boundary. Symmetry properties"  
 soumis à *J.Geomag.Geolect.*
- Hurwitz L., Fabiano E.B., Peddie N.W., 1974  
 "A model of the geomagnetic field for 1970"  
*J.Geophys.Res.*, **79**, 1716-1717

- Jackson A., 1989  
 "The Earth's magnetic field at the core-mantle boundary"  
 Thèse, Université de Cambridge (G.B.)
- Jault D., Gire C., Le Mouél J.L., 1988  
 "Westward drift, core motions and exchanges of angular momentum between core and mantle"  
*Nature*, 333, 353-356
- Kahle A.B., Ball R.H., Vestine E.H., 1967  
 "Comparison of estimates of surface fluid motions of the Earth's core for various epochs"  
*J.Geophys.Res.*, 72, 4917-4925
- Kahle A.B., Vestine E.H., Ball R.H., 1967  
 "Estimated surface motions of the Earth's core"  
*J.Geophys.Res.*, 72, 1095-1108
- Lambeck K., 1980  
 "The Earth's variable rotation"  
 Cambridge University Press
- Lambeck K., Cazenave A., 1973  
 "The Earth's rotation and atmospheric circulation I Seasonal variations"  
*Geophys.J.Roy.astr.Soc.*, 32, 79-93
- Lambeck K., Cazenave A., 1976  
 "Long term variations in length of day and climatic change"  
*Geophys.J.Roy.astr.Soc.*, 46, 553-573
- Langel R.A., Estes R.H., 1985  
 "The near Earth magnetic field at 1980 determined from MAGSAT data"  
*J.Geophys.Res.*, 90, 2495-2509
- Langel R.A., Estes R.H., Mead G.D., 1982  
 "Some new methods in geomagnetic field modelling applied to the 1960-1980 epoch"  
*J.Geomagn.Geolectr.*, 34, 327-349
- Langel R.A., Kerridge D.J., Barraclough D.R., Malin S.R.C., 1986  
 "Geomagnetic temporal change: 1903-1982, a spline representation"  
*J.Geomagn.Geolectr.*, 38, 573-597
- Le Mouél, 1976  
 "L'induction dans le globe"  
 dans "Traité de Géophysique Interne", Coulomb J., Jobert G., Masson, Paris
- Le Mouél J.L., Gire C., Madden T., 1985  
 "Motions at core surface in the geostrophic approximation"  
*Phys.Earth Planet.Inter.* 39, 270-287
- Le Mouél J.L., Jault D., Gire C., 1987  
 "Sur la forme des mouvements lents animant le fluide du noyau terrestre"  
*C.R.Acad.Sci. Paris*, t.305, Série II, pp 619-624

- Le Mouél J.L., Madden T.R., Ducruix J., Courtillot V., 1981  
 "Decade fluctuations in geomagnetic westward drift and Earth rotation"  
*Nature*, 290, 763-765
- Li X., Jeanloz R., 1989  
 "Measurement of the electrical conductivity of a perovskite-magnesiowüstite assemblage"  
*EOS*, 70, 1369
- Lloyd D., Gubbins D., 1990  
 "Toroidal fluid motion at the top of the earth's core"  
*Geophys.J.Int.*, 100, 455-467
- Loper D.E., Benton E.R., 1970  
 "On the spin-up of an electrically conducting fluid, Part 2 Hydromagnetic spin-up between infinite flat insulating plates"  
*J.Fluid Mech.*, 43, 785-799
- Madden T., Le Mouél J.L., 1982  
 "The recent secular variation and the motions at the core surface"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, A306, 271-280
- Mignard F., 1986  
 "Tidal and non-tidal Earth's rotation"  
 dans "Earth's rotation: solved and unsolved problems", A.Cazenave ed., NATO ASI series
- Morelli A., Dziewonski A.D., 1987  
 "Topography of the core-mantle boundary and lateral homogeneity of the liquid core"  
*Nature*, 325, 678-683
- Morrison L.V., 1978  
 "Re-determination of the decade fluctuations in the rotation of the Earth in the period 1861-1978"  
*Geophys.J.R.astr.Soc.*, 58, 349-360
- Peddie N.W., Fabiano E., 1982  
 "A proposed International Geomagnetic Reference Field for 1965-1985"  
*J.Geomag.Geolect.*, 34, 357-364
- Peddie N.W., Zunde A.Z., 1987  
 "A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983"  
*Phys.Earth Planet.Inter.*, 48, 324-329
- Pedloski J., 1979  
 "Geophysical Fluid Dynamics"  
 Springer-Verlag, New-York
- Peyronneau , Poirier, 1989  
 "Electrical conductivity of the Earth's lower mantle"  
*Nature*, 342, 537-539
- Poirier J.P., 1988  
 "Transport properties of liquid metals and viscosity of the Earth's core"  
*Geophys.J.*, 92, 99-105

- Rakotozafy, 1988  
 "Etude de la variation séculaire du champ géomagnétique"  
 Thèse, Université de Madagascar
- Roberts P.H., Scott S., 1965  
 "On the analysis of the secular variation 1. A hydromagnetic constraint: theory"  
*J.Geomagn.Geolect.*, **17**, 137-151
- Roberts, 1972  
 "Electromagnetic core-mantle coupling"  
*J.Geomag.Geolectr.*, **24**, 231-259
- Robertson D.S., Carter W.E., Campbell J., Schuh H., 1985  
 "Daily UT1 determinations from IRIS very long baseline interferometry"  
*Nature*, **316**, 424-427
- Rochester M.G., 1960  
 "Geomagnetic westward drift and irregularities in the Earth's rotation"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.*, **A252**, 531-555
- Rochester M.G., 1962  
 "Geomagnetic core-mantle coupling"  
*J.Geophys.Res.*, **67**, 4833-4836
- Rosen R.D., Salstein D.A., 1983  
 "Variations in atmospheric angular momentum on global and regional scales and the length of day"  
*J.Geophys.Res.*, **88**, 5451-5470
- Rubincam D.P., 1984  
 "Post-glacial rebound observed by Lageos and the effective viscosity of the lower mantle"  
*J.Geophys.Res.*, **89**, 1077-1087
- Souriau A., Cazenave A., 1985  
 "Reevaluation of the Chandler wobble seismic excitation from recent data"  
*Earth Planet. Sci. Lett.*, **75**, 410-416
- Stephenson F.R., Morrison L.V., 1984  
 "Long-term changes in the rotation of the Earth: 700 B.C. to A.D.1980"  
*Phil.Trans.R.Soc.Lond.A*, **313**, 47-70
- Stix M., Roberts P.H., 1984  
 "Time-dependent electromagnetic core-mantle coupling"  
*Phys.Earth Planet.Inter.*, **36**, 49-60
- Taylor J.B., 1963  
 "The magnetohydrodynamics of a rotating fluid and the Earth's dynamo problem"  
*Proc.R.Soc.*, **A274**, 274-283
- Vestine E.H., Laporte L., Cooper C., Lange I., Hendrix W.C., 1947  
 Carnegie Institution Publ. 578
- Vondrak J., 1985  
 "Long-period behaviour of polar motion between 1900.0 and 1984.0"  
*Annales Geophysicae*, **3**, 3, 351-356

- Voorhies C.V., 1986a  
 "Steady flows at the top of the Earth's core derived from geomagnetic field models"  
*J.Geophys.Res.*, **91**, 12444-12466
- Voorhies C.V., 1986b  
 "Steady surficial core motions: an alternate method"  
*Geophys.Res.Lett.*, **13**, 1537-1540
- Voorhies C.V., Backus G.E., 1985  
 "Steady flows at the top of the core from geomagnetic field models: the steady motions theorem"  
*Geophys.Astrophys.Fluid Dynamics*, **32**, 163-173
- Voorhies C.V, Benton E.R., 1982  
 "Pole-strength of the earth from MAGSAT and magnetic determination of the core radius"  
*Geophys.Res.Lett.*, **9**, 258-261
- Wahr J., 1983  
 "The effects of the atmosphere and oceans on the Earth's wobble and on the seasonal variations in the length of day II results"  
*Geophys.J.R.Astron.Soc.*, **74**, 451-487
- Wahr J., 1988  
 "The Earth's rotation"  
*Ann. Rev. Earth Planet. Sci*, **16**, 231-2
- Whaler K.A., 1980  
 "Does the whole of the Earth's core convect"  
*Nature*, **287**, 528-530
- Whaler K.A., 1984  
 "Fluid upwelling from the core-mantle boundary - resolvability from surface geomagnetic data"  
*Geophys.J.R.Astr.Soc.*, **78**, 453-473
- Whaler K.A., Clarke S.O., 1988  
 "A steady velocity field at the top of the earth's core in the frozen-flux approximation"  
*Geophys.J.*, **94**, 695-721
- Yoder C.F., Williams J.G., Dickey J.O., Schutz B.O., Eanes R.J., Tapley B.D., 1983  
 "Secular variation of Earth's gravitational harmonic  $J_2$  coefficient from Lageos and nontidal acceleration of Earth rotation"  
*Nature*, **303**, 757-762
- Yoder C.F., Williams J.G., Parke M.O., 1981  
 "Tidal variations of Earth rotation"  
*J.Geophys.Res.*, **86**, 881-891

**Annexe 1: Base tangentielle géostrophique, Expression de  $u_\theta$ ,  $u_\phi$ ,  $p$  et  $\rho_1$  en fonction de  $u_r$  et de ses dérivées radiales**

Les équations (22) et (23) du chapitre (I.2) permettent d'exprimer les composantes  $\rho u_\theta$ ,  $\rho u_\phi$ ,  $p$  et  $\rho_1$  d'un champ de vitesse tangentielle géostrophique en fonction de  $\rho u_r$  et de ses dérivées radiales. Nous pouvons alors construire une base tangentielle géostrophique à partir d'un développement de  $\rho u_r$  en harmoniques sphériques: à chaque harmonique, correspond un élément de la base. Je cherche ici à exprimer chaque élément de cette base comme somme de termes poloïdaux et toroïdaux élémentaires. Le champ de vecteurs solénoïdal  $\rho \vec{u}$  s'écrit:

$$\begin{aligned}\rho \vec{u} &= \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge (\vec{r} p) + \vec{\nabla} \wedge (\vec{r} t) \\ &= f \vec{e}_r + \vec{\nabla}_s g + \vec{e}_r \wedge \vec{\nabla}_s h\end{aligned}$$

avec 
$$f = \frac{1}{r} L_S^2 p \quad g = \frac{1}{r} \frac{\partial (r p)}{\partial r} \quad h = -t \quad (1)$$

Notre point de départ est le développement de  $\rho u_r$  en harmoniques:

$$\rho u_r = f = \sum_{n,m} f_n^m Y_n^m$$

où 
$$Y_n^m = P_n^m(x) e^{(im\phi)} \quad \text{avec} \quad x = \cos\theta$$

je note 
$$P_n^m = \frac{\partial P_n^m}{\partial x}$$

alors 
$$\frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} = -\sin\theta P_n^m(\cos\theta)$$

$P_n^m$ , fonction associée de Legendre non normalisée. L'équation (1) se transforme en

$$\begin{aligned}p &= \sum_{n,m} \frac{r f_n^m}{n(n+1)} Y_n^m \\ g &= \sum_{n,m} \frac{1}{n(n+1)} (2f_n^m + r f_n^m) Y_n^m\end{aligned}$$

Nous connaissons le vecteur vitesse et sa partie poloïdale; il ne reste plus qu'à transformer la différence de ces deux vecteurs, la partie toroïdale, en vecteurs élémentaires toroïdaux. Cette décomposition peut s'effectuer à partir des coordonnées  $\rho u_\theta$ , ou  $\rho u_\phi$ . J'utilise ici  $\rho u_\theta$ . D'après (22) (I.2), si  $\vec{u}$  est tangentielllement géostrophique

$$\rho u_\theta = (-r f'_n{}^m \cotg \theta P_n^m - \sin \theta f_n^m P_n^m) e^{im\phi}$$

la sommation sur  $n$  et  $m$  est désormais sous-entendue; nous connaissons la partie poloïdale de  $\rho u_\theta$

$$\rho u_{\theta,p} = -\frac{\sin \theta}{n(n+1)} P_n^m (2f_n^m + r f'_n{}^m) e^{im\phi}$$

donc la partie toroïdale s'écrit

$$\begin{aligned} \rho u_{\theta,t} & \left( -\cotg \theta P_n^m + \frac{\sin \theta}{n(n+1)} P_n^m \right) r f'_n{}^m e^{im\phi} \\ & + \left( -\sin \theta P_n^m + \frac{2}{n(n+1)} \sin \theta P_n^m \right) f_n^m e^{im\phi} \end{aligned} \quad (2)$$

Il s'agit maintenant de décomposer  $\rho u_\theta$  en vecteurs toroïdaux élémentaires  $\vec{e}_r \wedge \vec{\nabla} Y_n^m$

$$(\vec{e}_r \wedge \vec{\nabla} Y_n^m)_\theta = \frac{-im P_n^m}{\sin \theta} e^{im\phi} \quad (3)$$

A la surface du noyau  $f_n^m = 0$ ; nous retrouvons la base tangentielllement géostrophique (Le Mouél et al., 1985) à la surface du noyau en nous restreignant aux coefficients de  $r f'_n{}^m$ . Les relations de récurrence entre fonctions de Legendre non normalisées permettent d'écrire  $\rho u_{\theta,t}$  en ne faisant intervenir que des termes de type (3).

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta P_n^m & = (n+1) \cos \theta P_n^m - (n-m+1) P_{n+1}^m \\ \cos \theta P_n^m & = \frac{n-m+1}{2n+1} P_{n+1}^m + \frac{n+m}{2n+1} P_{n-1}^m \end{aligned}$$

alors

$$\begin{aligned}
-\cot\theta P_n^m + \frac{\sin\theta}{n(n+1)} P_n^m &= \frac{1}{\sin\theta} \left( -\frac{n-1}{n} \cos\theta P_n^m - \frac{n-m+1}{n(n+1)} P_{n+1}^m \right) \\
&= \frac{1}{\sin\theta} \left( -\frac{n-1}{n} \left( \frac{n-m+1}{2n+1} P_{n+1}^m + \frac{n+m}{2n+1} P_{n-1}^m \right) - \frac{n-m+1}{n(n+1)} P_{n+1}^m \right) \\
&= -\frac{1}{n(n+1)\sin\theta} \left( \frac{n(n+2)(n-m+1)}{2n+1} P_{n+1}^m + \frac{(n^2-1)(n+m)}{2n+1} P_{n-1}^m \right)
\end{aligned}$$

Finalemment

$$h = - \sum_{n,m} \frac{i}{n,m} e^{im\phi} \frac{r f_n^m}{n(n+1)} \left( \frac{n(n+2)(n-m+1)}{2n+1} P_{n+1}^m + \frac{(n^2-1)(n+m)}{2n+1} P_{n-1}^m \right)$$

; un vecteur tangentiellement géostrophique s'écrit

$$\rho \vec{u} = \sum_{n,m} \frac{r f_n^m}{n(n+1)} (\vec{\nabla}_s Y_n^m - \frac{i}{m} \left( \frac{n(n+2)(n-m+1)}{2n+1} \vec{e}_r \wedge \vec{\nabla} Y_{n+1}^m + \frac{(n^2-1)(n+m)}{2n+1} \vec{e}_r \wedge \vec{\nabla} Y_{n-1}^m \right))$$

Il ne reste plus qu'à écrire la décomposition du terme en facteur de  $f_n^m$  dans (2)

$$\begin{aligned}
-\sin\theta P_n^m + \frac{2}{n(n+1)} \sin\theta P_n^m &= -\frac{1}{\sin\theta} \frac{(n-1)(n+2)}{n(n+1)} \sin^2\theta P_n^m \\
&= -\frac{1}{\sin\theta} \frac{(n-1)(n+2)}{n(n+1)} \left( \frac{n+1}{2n+1} ((n-m+1)P_{n+1}^m + (m+n)P_{n-1}^m) - (n-m+1)P_{n+1}^m \right) \\
&= \frac{1}{\sin\theta} \frac{(n-1)(n+2)}{n(n+1)} \left( \frac{n(n-m+1)}{2n+1} P_{n+1}^m - \frac{(n+1)(m+n)}{2n+1} P_{n-1}^m \right)
\end{aligned}$$

La décomposition globale d'un vecteur géostrophique en parties poloïdale et toroïdale, dans le noyau, s'écrit

$$\begin{aligned}
\rho \vec{u} &= \sum_{n,m} \frac{1}{n(n+1)} \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla} \wedge (r f_n^m Y_n^m) \\
&+ \vec{\nabla} \wedge \left( \frac{i}{m} (r^2 f_n^m \left( \frac{n(n+2)(n-m+1)}{2n+1} Y_{n+1}^m + \frac{(n^2-1)(n+m)}{2n+1} Y_{n-1}^m \right) \right. \\
&\left. + r f_n^m \left( -\frac{(n-1)(n+2)n(n-m+1)}{2n+1} Y_{n+1}^m + \frac{(n-1)(n+2)(n+1)(n+m)}{2n+1} Y_{n-1}^m \right) \right)
\end{aligned}$$

A l'aide de la troisième composante  $\rho u_\phi$ , on vérifie ce résultat après des calculs du même genre.

**Annexe 2: couple électromagnétique "toroïdal" associé à une rotation en bloc du noyau par rapport au manteau**

A partir de la formule (26) de II.1, nous pouvons exprimer le couple électromagnétique toroïdal associé à une rotation en bloc du noyau par rapport au manteau. Les notations sont définies dans le chapitre II.1. Nous caractérisons une rotation en bloc par sa vitesse angulaire  $t_1^0$  :

$$\vec{u} = ct_1^0 \sin \theta \vec{e}_\phi$$

Nous pouvons exprimer la partie toroïdale de  $\vec{u} B_r$  (c'est à dire  $(\vec{\nabla} \wedge (\vec{r} \phi))$ ) en calculant  $\vec{e}_r \cdot \vec{\nabla} \wedge (\vec{r} B_r)$  :

$$\begin{aligned} \vec{e}_r \cdot \vec{\nabla} \wedge \vec{\nabla}(\vec{r} \phi) &= \frac{1}{c \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (ct_1^0 B_r \sin^2 \theta) \\ &= \frac{1}{c} L^2 \phi \end{aligned}$$

où l'opérateur  $L^2$  peut se définir comme

$$L^2 U = \left( \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rU) - \Delta U \right) r^2$$

en particulier

$$L^2 Y_n^m = n(n+1) Y_n^m$$

$\phi$  s'exprime

$$\begin{aligned} \phi &= ct_1^0 L^{-2} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (B_r \sin^2 \theta) \right) \\ B_r &= \sum (n+1) \left( \frac{\alpha}{r} \right)^{n+2} (g_n^m, h_n^m) P_n^m(\cos \theta) (\cos m\phi, \sin m\phi) \end{aligned}$$

combinant les relations de récurrence entre polynômes de Legendre non normalisés, nous obtenons

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} (P_{n,m} \sin^2 \theta) = \frac{(n+2)(n-m+1)}{2n+1} P_{n+1,m} - \frac{(n-1)(n+m)}{2n+1} P_{n-1,m}$$

c'est à dire

$$\phi = ct_1^0 \sum_{n,m} (n+1) \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{n+2} (g_n^m \cos m\phi, h_n^{\sin} m\phi) \lambda_n^m$$

$$\left( \frac{1}{\lambda_{n+1}^m (2n+1)(n+1)} P_{n+1}^m - \frac{1}{\lambda_{n-1}^m (2n+1)n} P_{n-1}^m \right)$$

c'est à dire

$$\phi_n^m = \frac{ct_1^0}{\lambda_n^m} \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{n+1} (g_{n-1}^m, h_{n-1}^m) \lambda_{n-1}^m \frac{n-m}{2n-1} - \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{n+3} (g_{n+1}^m, h_{n+1}^m) \lambda_{n+1}^m \frac{(n+m+1)(n+2)}{(n+1)(2n+3)}$$

Nous pouvons reporter cette expression dans (26)

$$\Gamma_{e,t,1} = -4\pi c^5 \sigma_c t_1^0 \sum_{n,m} \frac{n+1}{2n+1}$$

$$\left( (g_n^{m^2} + h_n^{m^2}) \left( \frac{(n+2)(n-m+1)(n+m+1)}{(2n+1)(2n+3)q_{n+1}} + \frac{(n^2-m^2)(n^2-1)}{n(2n+1)(2n-1)q_{n-1}} \right) \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{2n+4} \right.$$

$$\left. - 2 \frac{\lambda_{n+2}^m}{\lambda_n^m} (g_n^m g_{n+2}^m + h_n^m h_{n+2}^m) \frac{(n+m+1)(n+m+2)(n+3)}{(2n+3)(2n+5)q_{n+1}} \left(\frac{\alpha}{c}\right)^{2n+6} \right) \quad (A2.1)$$

Nous pouvons comparer cette expression avec les formules (30) à (33) et (35) de Braginsky et Fishman (1976). Ils furent les premiers à introduire un modèle de conductivité du manteau de type (10) dans ce type d'étude (couplage électromagnétique). Braginsky et Fishman n'ont pas introduit de limite supérieure  $b$  à la couche conductrice du manteau et ne peuvent pas écrire l'annulation du champ toroïdal à la frontière avec le milieu isolant; ils remplacent  $q_n$  (équation (25)) par  $k^-$ , ce qui est une bonne approximation lorsque  $\alpha$  est grand. A cette réserve près, je retrouve leurs formules. Ils ajoutent un dernier terme (leur équation (34)) qui correspond au couple poloïdal. Greiner-Mai (1989) fonde son étude du couplage électromagnétique sur l'expression (A2.1), qu'il a calculée exactement.

## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements</b>		1
<b>Introduction</b>		3
<b>PREMIERE PARTIE: Variations comparées du moment cinétique du noyau et du manteau.</b>		<b>6</b>
1.	<b>Fluctuations de la longueur du jour</b>	7
1.1	Observations	7
1.1.1	Mouvement du pôle	7
1.1.2	Mesure des fluctuations de la durée du jour	8
1.2	Ralentissement séculaire de la rotation de la Terre	9
1.3	Fluctuations rapides (quelques mois à quelques années) de la longueur du jour	12
1.4	Fluctuations de la durée du jour attribuées à une interaction noyau-manteau	13
2.	<b>Mouvements lents, de grande échelle, dans le noyau</b>	<b>15</b>
2.1	La variation séculaire du champ magnétique terrestre	15
2.1.1	Observation et description	15
2.1.2	Modèles du champ et de sa variation: développement en harmoniques	17
2.1.3	Cartes du champ à la surface du noyau	18
2.2	Variation séculaire du champ magnétique terrestre et mouvements à la surface du noyau	19

2.3	Informations a priori sur les mouvements à la surface du noyau	28
2.3.1	Indétermination des mouvements	28
2.3.2	Contraintes sur les variations temporelles et spatiales du champ de vitesse	29
2.3.3	Mouvements tangentiellement géostrophiques à la surface du noyau	30
2.3.4	Prolongement des mouvements tangentiellement géostrophiques à l'intérieur du noyau	37
2.3.5	Symétrie du champ de vitesse par rapport au centre de la Terre	39
2.3.6	Mouvements toroïdaux	42
2.3.6.1	Noyau stratifié et mouvements toroïdaux	42
2.3.6.2	Mouvements toroïdaux	44
2.4	Les mouvements à la surface du noyau	50
2.4.1	Les grands traits du mouvement	50
2.4.2	La partie toroïdale zonale du mouvement	54
2.4.2.1	Bref historique de l'étude de la dérive vers l'ouest de la figure du champ magnétique à la surface de la Terre	54
2.4.2.2	Les mouvements toroïdaux zonaux: des mouvements de la surface du noyau parmi d'autres mais particulièrement mal déterminés	58
2.4.3	Evolution des mouvements	62
2.5	Le moment cinétique du noyau	63
2.5.1	Rotations rigides de cylindres centrés sur l'axe de rotation de la Terre	64

2.5.2	Calcul du moment cinétique du noyau	67
2.5.3	Validation du modèle	69
	<b>DEUXIEME PARTIE: Les couples à l'origine des transferts</b>	<b>74</b>
	<b>de moment cinétique entre le noyau et le manteau</b>	
	<b>Introduction</b>	<b>75</b>
<b>1</b>	<b>Le couple exercé par les forces de Lorentz dans le manteau inférieur</b>	<b>77</b>
1.1	Le principe de calcul du couple électromagnétique: un développement en perturbations	77
1.2	Le couple électromagnétique "poloïdal"	79
1.3	Le couple électromagnétique "toroïdal"	82
1.3.1	Principe du calcul	82
1.3.2	Expression du couple électromagnétique (et en particulier de sa partie "toroïdale") comme intégrale de surface	85
1.3.3	Formulation du couple électromagnétique comme fonction de la partie toroïdale de $\vec{u}_{B_r}$	88
1.3.4	Détermination de la partie toroïdale de $\vec{u}_{B_{r,o}}$	90
1.4	Etude numérique du couple électromagnétique	92
1.4.1	La conductivité du manteau inférieur	92
1.4.2	Intensité du couple électromagnétique "toroïdal"	97
1.5	Fluctuations du couple électromagnétique	102
1.5.1	Amplitude des fluctuations	102
1.5.2	Un couple stable: le couple produit par la diffusion de champs toroïdaux du noyau dans le manteau	103
1.5.3	Evolution comparée du couple électromagnétique et des mouvements du noyau	108

<b>2</b>	<b>Couple exercé par la pression associée aux mouvements dans le noyau sur le manteau</b>	<b>110</b>
2.1	Couple de pression associé à un mouvement tangentiellement géostrophique	111
2.2	Couple de gravité	113
2.3	Calculs numériques du couple de pression	114
2.4	Excitation de l'oscillation de Chandler	115
<b>3</b>	<b>Etude du couple topographique associé à des mouvements tangentiellement géostrophiques à la surface du noyau; conséquences sur l'organisation du mouvement à l'intérieur du noyau</b>	<b>119</b>
<b>4</b>	<b>Contraintes sur la frontière noyau-manteau déduites de l'étude du couple de pression agissant entre noyau et manteau</b>	<b>143</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>180</b>
	<b>Références</b>	<b>183</b>
	Annexe 1: Base tangentiellement géostrophique	192
	Annexe 2: couple électromagnétique toroïdal, associé à une rotation en bloc	195

## LISTE DES ILLUSTRATIONS

## Chapitre I.1

- Figure 1: écart à 86400s de la longueur du jour, corrigé de l'effet des marées zonales; décomposition en une tendance et des termes saisonniers et irréguliers (Feissel et Gavoret, 1987) 14

## Chapitre I.2

- Figure 1: carte du champ à la surface du noyau, centrée sur le méridien de Greenwich, construite à partir du modèle IGRF80. 24
- Figure 2: démonstration de l'unicité d'un mouvement tangentiellement géostrophique et symétrique par rapport au centre de la Terre. 41
- Figure 3: carte des grands traits du mouvement (admis par la plupart des équipes travaillant au calcul de champs de vitesse à la surface du noyau). 52
- Figure 4: pression à la surface du noyau (associée au champ de vitesse calculé pour l'époque 1980 par Gire et Le Mouél, 1990) 53
- Figure 5: dérive vers l'ouest  $u_x, u_y, u_z$  des trois composantes X, Y, Z du champ magnétique à la surface de la Terre intégrée entre 1907.5 et 1945, d'après Bullard (1950). 56

Figure 6: variation séculaire en 1980, prolongée à la surface du noyau (modèle de Peddie et Fabiano (1982)).	60
Figure 7: variation séculaire créée par les seuls mouvements toroïdaux zonaux (modèle de Gire et Le Mouél (1990) pour l'époque 1980).	61
Figure 8: mouvements toroïdaux zonaux calculés à partir de différents modèles de variation séculaire.	72
Figure 9: comparaison des variations de $(-I_n \Delta \omega_e)$ et $(I_T \Delta \Omega)$ entre 1965 et 1982.	

## Chapitre II.1

Figure 1: comparaison des modèles (1) et (2) de conductivité du manteau inférieur avec différentes estimations	96
Figure 2: conductivité du manteau inférieur, conductivité à la base du manteau, temps de traversée du manteau, conductivité calculée à partir de l'étude des signaux externes, et intensité du couple électromagnétique toroïdal.	101

## Chapitre II.2

Figure 1: bosse du noyau	110
--------------------------	-----