CHAPITRE III : Conclusion et Perspectives

Dans les deux premiers chapîtres, j'ai résumé les différents travaux entrepris depuis la fin de ma thèse. Ils sont essentiellement axés autour de deux thèmes: les déformations et la rotation, sur des échelles de temps allant de la journée (Terre élastique) à quelques millions d'années (Terre visqueuse). Parmi tous les sujets évoqués, j'en retiendrais deux ici, qui me semblent être, par leur originalité, ma contribution la plus importante à la compréhension scientifique de la dynamique globale de la Terre:

Déformations de degré 1 et géocentre:

Je me suis intéressée à l' étude théorique des déformations de degré 1 induites par différentes sources d'excitation. Dans le degré 1 de la décomposition en harmoniques sphériques des différents paramètres qui décrivent le modèle, les équations de mouvement doivent être modifiées pour prendre en compte la conservation du centre de masse. Les déformations élastiques ont été calculées pour des pressions et des tractions agissant aux interfaces solide-fluide de la Terre (graine-noyau, CMB, surface); en particulier nous avons montré que la résultante de ces forces surfaciques agissant sur la Terre devait être nulle, dans un repère lié au centre de masse (Greff et Legros, 1997). Le problème du choix du référentiel (lié au centre de masse, au centre de figure ...) a été étudié précisément, dans le cadre du Groupe de Recherche AGRET, afin de relier nos résultats théoriques aux observations actuelles de la variation du géocentre (Greff et al., 2001). Comme application géophysique, nous avons calculé les variations annuelles et semi-annuelles du géocentre induites par les surcharges atmosphériques continentales puis les avons comparées à différents types d'observations géodésiques (SLR, Doris, GPS ...). A plus grande échelle de temps, les déformations viscoélastiques avec en particulier, l'existence et la valeur des modes de relaxation associés, ont été calculées. L'influence du contraste de viscosité entre le manteau supérieur et le manteau inférieur sur le taux de variation du géocentre induit par la dernière déglaciation a été établie (Greff, 2000).

Résonances de la FCN

Un travail commencé à la fin de ma thèse sur de possibles mises en résonance des modes propres en rotation presque-diurnes du noyau et de la graine sous l'action du potentiel de marées luni-solaires a été poursuivi et développé. En prenant en compte la décélération séculaire de la vitesse de rotation de la Terre et l'évolution dans le temps de l'orbite lunaire, nous avons montré que des résonances ont pu se produire dans le passé à des dates corrélées avec des événements magnétiques et géologiques majeurs (limite Permo-Trias, vers -1.8 et -3 milliards d'années ...). Ce problème de dynamique globale permet de relier différents phénomènes de géophysique interne et de mécanique céleste à différentes échelles de temps (diurne et géologique) et donne des résultats très enthousiasmants (Greff et Legros, 1999-a, 1999-b). Nous avons calculé les couples de frottement visco-magnétiques à la CMB et à l'ICB ainsi que la puissance visco-magnétique extraite de l'énergie cinétique de la Terre.

L'ordre de grandeur de cette puissance dissipée peut atteindre, aux dates de résonance, des valeurs comparables au flux de chaleur sortant actuellement du noyau. De tels événements pourraient entraîner des instabilités dans la couche thermique D" à la base du manteau et en conséquence donner naissance à des points chauds. Nous avons proposé de corréler ces dates de résonance avec des épisodes de formation de la croûte continentale à l'Archeen et au Proterozoique, ainsi qu'avec la mise en place des traps de Sibérie. Nous avons également réfléchi sur la perturbation qu'engendreraient ces résonances dans l'équilibre dynamique du noyau: si ces perturbations existent, l'état actuel de nos connaissances ne nous permet pas de les corréler avec des événements majeurs dans le champ magnétique (intensité et inversions). Une réflexion sur ce sujet est envisagée avec J. Noir (qui s'est intéressé à ces résonances lors de la fin de sa thèse) et D. Jault (LGIT, Grenoble), en particulier pour comprendre les effets non-linéaires qui peuvent exister pendant la durée de tels événements.

J'ai déjà évoqué à la fin de chaque chapître, différentes perspectives de recherche. Je vais les reprendre, en ajoutant ici des études faites dans le cadre de projets spatiaux: tout d'abord le projet LICODY que je coordonne et le projet NEIGE (expérience géodésique sur Mars de NETLANDER) coordonné par J.P. Barriot et V. Dehant. Un projet d'études des librations de la Lune est également présenté.

1 Observations de la Terre et des planètes depuis l'espace

1.1 LICODY ou "Peut-on observer la dynamique du noyau depuis l'espace à l'aide des signaux de gravité"

LICODY (Laser Interferrometry for Core and Oceans Dynamics) est un projet proposé en réponse à l'appel à idée de l'ESA sur la prochaine Core Mission. Son objectif principal est d'étudier la dynamique du noyau liquide et de la graine de la Terre à partir des variations temporelles du champ de gravité global. Les participants sont:
- I.P.G.P.: Greff, Lognonné, Diament, Le Mouel, Labrosse, Hulot
- O.R.B.: Dehant, Van Hoolst
- E.O.S.T.: Legros, Gegout, Hinderer
- O.M.P.: Balmino, Biancale, Rieutort, Souriau
- O.N.E.R.A.: Touboul

ainsi que des chercheurs canadiens (Aldridge, Smylie, Szeto, Crossley, Forte) et américains (Wahr, Folkner, Watkins).

Ce projet n'a pas été retenu par l'ESA, mais son originalité et son intérêt scientifique ont été reconnus. Il nous a été suggéré de créer un groupe de travail afin d'approfondir l'aspect scientifique et surtout la partie technique de LICODY. Un soutien financier du CNES a été obtenu dans cet objectif.
L'objectif scientifique de LICODY est de déterminer la structure du noyau et sa dynamique. Les observations sismologiques sont limitées et les gravimètres supra-conducteurs

à la surface de la Terre n'ont permis que de détecter un mode de rotation lié au noyau fluide et peut-être le triplet de modes de translation de la graine (modes de Slichter). La précision nécessaire à notre projet est ambitieuse: 10^{-15} m^2/s^2. Cela permettrait d'étudier différents points liés à la dynamique du noyau:

- les modes propres de rotation du noyau et de la graine, FCN et FICN, qui dépendent des propriétés géométriques et rhéologiques de la Terre profonde
- les modes gravito-inertiels et sismiques du noyau (et du manteau)
- les modes de Slichter de translation de la graine
- les mouvements dans le noyau fluide sur une échelle de temps décennale
- la rotation différentielle de la graine

Les deux derniers mouvements se font sur une plus grande échelle de temps (la dizaine d'années) donc leur détection sera beaucoup plus difficile à réaliser. Néanmoins, ils perturbent le signal de gravité en surface avec le même ordre de grandeur que les premiers points.
Les observations de ces modes liés à la dynamique du noyau permettraient de déduire de nombreuses informations sur les propriétés géométriques, physiques et rhéologiques de la Terre profonde.
Du fait de l'extrême sensibilité des mesures envisagées, les variations temporelles de gravité induites par des surcharges océaniques ou atmosphériques sur des périodes de temps saisonnière ou annuelle seront détectables.
Un travail théorique préliminaire à ce projet consiste à étudier comment ces signaux issus de deux régions du globe (surface et noyau) peuvent se décorreler. Des modèles synthétiques doivent être construits.

Le concept technique de LICODY est basé sur une mesure très précise, par interferrométrie Laser, de la distance entre plusieurs satellites en orbite autour de la Terre. Cette technique est comparable à celle développée pour la mission LISA. Nous envisageons de placer plusieurs satellites (disons 3) sur la même orbite polaire. Les variations latérales du champ de gravité variant dans le temps affecteront différemment la trajectoire des 3 satellites. La distance satellite-satellite oscillera aux fréquences obtenues en combinant la fréquence orbitale avec les fréquences propres de la Terre (et en particulier du noyau).
La détermination des orbites des satellites ainsi que l'étude du système Laser doivent être étudiées en détail.

1.2 NEIGE : Etudes des nutations martiennes

L'objectif de la mission Netlander est de déployer un réseau de quatre stations géophysiques et météorologiques à la surface de Mars (pour plus de détail voir le site du Département d'Etudes Spatiales de l'IPGP: *http://ganymede.ipgp.jussieu.fr/projets/netlander*) afin d' obtenir des informations concernant la structure interne et de subsurface de la planète, sa minéralogie de surface, ses processus d'altération et la dynamique de son atmosphère.

L'expérience de géodésie NEIGE (Netlander Ionosphere and Geodesy Experiment) permettra de mesurer l'orientation de la planète Mars, son mouvement du pôle de rotation, sa longueur du jour ainsi que sa précession et ses nutations. Les méthodes théoriques et les outils numériques que nous avons mis au point dans l'étude de la déformation élastique, visco-élastique ou visqueuse et de la rotation de la Terre peuvent s'appliquer avec quelques modifications à la planète Mars. Un groupe de travail, organisée par V. Dehant (Observatoire Royal de Belgique) projette de modéliser les intérieurs plausibles de Mars pour calculer les implications géodésiques (déformations et rotations) des différents paramètres (dimensions de la graine et du noyau, leur formes, la rhéologie de leur manteau etc...) qui interviennent dans la modélisation. Différents résultats ont déjà été obtenus, en particulier, pour le calcul la fonction de transfert de Mars pour les nutations, les marées et les surcharges superficielles.
Nous réfléchissons actuellement à la possibilité de l'existence d'une graine solide dans Mars. D'après l'étude des météorites SNC, le noyau de Mars serait composé de 54% de Fer, 39% de FeS et 7% de Nickel. L'existence d'une graine dépend fortement de la température à la CMB et donc de la dynamique du manteau. Une valeur assez faible ($< 2000^o$ K) est nécessaire pour que le noyau puisse se solidifier. Néanmoins, si on fait l'hypothèse que le pourcentage de Soufre dans Mars est légèrement inférieur à la valeur donnée par les météorites SNC (14%), une graine solide peut exister pour des températures plus élevées à la CMB. Nous étudions les répercussions que peut avoir l'existence d'une graine sur les nutations de la planète. Ma contribution a consisté à écrire un programme de calcul formel (Maple) pour étudier de façon analytique un modèle de planète à trois couches homogènes incompressibles: graine élastique, noyau fluide, manteau élastique, permettant dans un formalisme unique de connaître à la fois la déformation et la rotation de Mars. Le but recherché est d'estimer au mieux l'existence des résonances possibles (entre les ondes de marées et les modes propres de rotation) en fonction de la paramétrisation du modèle.

1.3 Librations de la Lune

Selon une méthodologie similaire, nous envisageons de revisiter l'étude des librations de la Lune dont l'explication théorique actuelle ne semble pas correspondre aux observations. Un projet a été déposé sur ce sujet dans le cadre du Plan National de Planétologie 2001 pour organiser des collaborations entre l'Université de Bordeaux (E. Bois), l'Observatoire Royal de Belgique (V. Dehant et son équipe), l'E.O.S.T. (H. Legros) et l'IPGP (moi-même).
Le but de ce projet est d'estimer le rôle possible d'un noyau lunaire fluide sur les mouvements de librations. On sait qu'un noyau fluide apporte dans la rotation d'un corps solide un degré de liberté supplémentaire dans son mouvement de rotation. La fréquence de ce mouvement dépend de la dimension et de l'aplatissement du noyau, ainsi que des propriétés rhéologiques du manteau de la planète. Dans un premier temps nous comptons tester les mouvements libres de librations pour diverses dimensions et divers aplatissements. En particulier, la Lune n'étant pas en équilibre hydrostatique (à cause de surcharges internes dans le manteau lunaire), son interface noyau-manteau ne le sera également pas et en conséquence, il est nécessaire de prendre en compte les effets de la

triaxialite sur les modes propres de rotation de la planète.
Dans un deuxième temps nous comptons analyser l'influence de phénomènes dissipatifs à l'interface noyau-manteau. Le manteau lunaire étant quasi-rigide et le champ magnétique inexistant, la dissipation est certainement liée à la viscosité du noyau fluide. Celle-ci engendre un couple visqueux à l'interface noyau-manteau qui d'une part, va perturber la période du mode propre de rotation presque diurne du noyau et d'autre part, atténuer l'amplitude du mouvement de rotation associé. Ce type de dissipation n'a jamais été considéré dans l'étude des librations et il pourrait permettre d'obtenir, a partir des observations des librations, des informations sur la viscosité du noyau lunaire.
Les résultats de ces diverses modélisations (géométriques et dissipatives) seront confrontés aux librations observées (par le Laser Lune) afin d'en déduire des informations sur la structure interne de la Lune.

Ces modélisations pourront être prolongées à la planète Mercure qui a, avec le Soleil, un comportement semblable à celui de la Lune avec la Terre (libration).

2 Dynamique interne de la Terre et de son noyau

2.1 Modes de Slichter

J'ai résolu analytiquement (à l'aide de Maple), pour le degré $n = 1$, le système de gravito-élasticité pour un modèle de Terre simplifié comprenant trois couches homogènes incompressibles (le manteau, le noyau et la graine), en conservant les termes inertiels, afin d'étudier le mode de Slichter. J'envisage (dans le cadre de la préparation de LICODY) de complexifier ce modèle en introduisant une graine à deux couches: une couche centrale rigide et une couche externe viscoélastique, ceci afin d'étudier l'influence de la viscosité de la graine sur la période et l'atténuation du mode de Slichter. Il faut noter que cette approche est différente de celle proposée par Smylie (1999, Science vol 284) qui introduisait une couche visqueuse dans le noyau fluide.

2.2 Variations latérales

La connaissance des déformations élastiques de la Terre est de toute première nécessité dans un très grand nombre de problèmes géodésiques et géophysiques: mesures gravimétriques, orbitographie satellitaire, effets des marées terrestres, effets des surcharges atmosphériques et océaniques ... Nous avons détaillé, dans la section 6 du chapître I, l'approche théorique utilisée pour développer des modèles de réponse élastique de la Terre en prenant en compte les variations latérales des propriétés physiques et rhéologiques. La résolution de ces équations se fera dans le cadre de la thèse de Laurent Métivier que je co-encadre avec M. Diament (Gravimétrie-IPGP), thèse démarrée en Octobre 2000, dont le sujet est "Etude de la structure profonde et superficielle de la Terre à l'aide de diverses fonctions forçantes: une approche par modélisation en éléments spectraux". La modélisation des perturbations générées par des variations latérales de densité et de rhéologie s'appliquera à l'étude des structures de grandes échelles, telles le super-bombement de Polynésie, mais aussi à des structures plus petites, telles que les édifices volcaniques. Cette approche sera ultérieurement mise en oeuvre pour d'autres planètes:

par exemple pour l'étude des marées de la planète Mars qui n'est pas en équilibre hydrostatique et qui possède des variations latérales à grande échelle d'origine dynamique comme Tharsis.

2.3 Grandes dérives du pôle ou TPW

Nous avons établi les équations non-linéaires qui gouvernent les phénomènes de "grandes dérives", c'est-à-dire d'un très grand déplacement de l'axe de rotation relativement au corps lui-même. Plusieurs applications liées à des répartitions de masse dans le manteau sont envisagées:

- tout d'abord, nous proposons d'étudier précisément les effets des deux super - bombements situés l'un sous l'Afrique, l'autre sous la Polynésie. La périodicité de ces mécanismes pourraient expliquer des irrégularités dans le TPW qui semble s'arrêter par moment puis rebrousser chemin. Cette étude sera faite en collaboration avec A. Davaille et J. Besse (IPGP).

- dans un deuxième temps, nous nous intéresserons à un autre phénomène lié à la dynamique du manteau: les avalanches, anomalies de densité à grande échelle avec des variations temporelles rapides.

Enfin, nous avons vu dans la section 5 du chapître II, que les cycles de glaciation-déglaciation se faisaient sur une échelle de temps de l'ordre de 100000 ans, donc très rapide devant l'échelle de temps de la convection. Néanmoins, il serait intéressant de tester si une suite de cycles glaciaires (avec une fonction temporelle en forme de dents de scie) ne pourrait pas générer un terme constant dans la dérive du pôle. En effet, la viscosité de la lithosphère étant très élevée comparée à celle du manteau, l'équilibre isostatique n'est pas complètement atteint en 100000 ans. Il reste un terme qui varie avec une échelle de temps plus longue. Une comparaison avec des données paléomagnétiques et des modèles de glaciations résultant de modélisations de paleoclimat pourrait être envisagée.

Pour finir, je souhaiterai conclure en disant que toutes les perspectives de recherche énoncées dans ce chapître, exceptée la dernière concernant les séries de glaciations, sont déjà commencées, voire bien avancées pour certaines (nutations martiennes, TPW et super-bombements). Des idées concernant d'autres applications de cette approche théorique pour modéliser les déformations et la rotation de la Terre et des planètes sur toutes les échelles de temps ne manquent pas.